

Morphologie de la galaxie¹

Ronald J. Buta

Département de physique et d'astronomie, Université d'Alabama, Box 870324, Tuscaloosa,

AL35487

Reçu _____; accepté _____

¹À paraître dans Planets, Stars and Stellar Systems, Vol. 6, éditeur de série TD

Oswalt, éditeur de volumes WC Keel, Springer Reference, 2011

– 2 –

ABSTRAIT

La morphologie des galaxies est le produit de la façon dont les galaxies se sont formées, de la façon dont elles s'interagissent. agi avec leur environnement, comment ils ont été influencés par des perturbations internes tion, AGN et matière noire, ainsi que leurs diverses histoires de formation d'étoiles. Ce l'article passe en revue la phénoménologie de la morphologie et de la classification des galaxies avec en vue de délimiter autant de types que possible et comment ils se rapportent aux interprétations. Les anciens systèmes de classification sont affinés et de nouveaux types sont introduits. car l'explosion des données morphologiques disponibles a modifié nos vues sur la structure et l'évolution des galaxies.

Vedettes-matières : galaxies : spirale ; galaxies : elliptiques ; galaxies : S0 ; galaxies : structure; galaxies : redshift élevé ; galaxies : classification ; galaxies : particulières ; galaxies : naines ; galaxies : amas ; galaxies : actives ; galaxies : isolées ; galaxies : Projet Zoo Galactique

Termes index : classification Hubble-Sandage-de Vaucouleurs ; galaxies spirales ; elliptique galaxies; Galaxies S0 ; galaxies irrégulières ; galaxies à anneaux de résonance ; anneaux extérieurs; anneaux intérieurs; anneaux nucléaires; barres secondaires; barres nucléaires; pseudo-anneaux; des spirales de grand design ; flocculant spirales; morphologies de fusion ; queues de marée ; galaxies annulaires collisionnelles ; galaxies à anneaux polaires; galaxies barrées ; galaxies de lentilles; cours de bras en spirale; galaxies spirales à contre-enroulement ; anémique galaxies spirales ; multiplicité des bras en spirale ; couloirs de poussière ; pseudobulges; renflements classiques; voie de poussière galaxies elliptiques ; galaxies à coquille/ondulation ; galaxies infrarouges ultra-lumineuses ; bar ansée; les membres les plus brillants du cluster ; galaxies à faible luminosité de surface ; galaxies naines ; spirale naine galaxies; galaxies sphéroïdales naines ; Projet Zoo Galactique ; galaxies isolées ; compact bleu galaxies naines ; morphologies des galaxies formant des étoiles ; disques déformés; morphologie de la masse stellaire ; cours de luminosité ; vélos elliptiques carrés; vélos elliptiques à disque ; galaxies de type tardif ; galaxies de type précoce ;

Galaxies barrées de Magellan ; morphologie des galaxies colorées ; galaxie gazeuse atomique et moléculaire
morphologie

Contenu

1. Introduction	6
2 Aperçu	8
Classement des 3 galaxies	12
4Un continuum de formes galactiques	15
5 types de galaxies : scène, famille et variété	17
5.1 Galaxies elliptiques et sphéroïdales	17
5.2 S0 et galaxies spirales	21
5.3 Galaxies irrégulières	27
6 autres dimensions de la morphologie des galaxies	28
6.1 Anneaux extérieurs et pseudo-anneaux	28
6.2 Lentilles intérieures et extérieures	30
6.3 Anneaux et barres nucléaires	31
6.4 Morphologies des bras en spirale	33
6.5 Effets de luminosité	37

7 La morphologie des barres et ovales galactiques	38
8 morphologies de poussière	41
9 Les morphologies des renflements galactiques	43
10 effets des interactions et des fusions	46
10.1 Anneaux normaux ou anneaux catastrophiques	46
10.2 Effets environnementaux sur les disques formant des étoiles	51
10.3 Galaxies en interaction et particulières	54
10.3.1 Queues de marée, bras et ponts	54
10.3.2 Vélos elliptiques Dust-Lane	55
10.3.3 Galaxies coquillages/ondulations	56
10.3.4 Galaxies infrarouges ultra-lumineuses	57
10.4 Déformations	58
10.5 La Morphologie des Galaxies Actives	59
10.6 La morphologie des membres du cluster les plus brillants	61
11 morphologies de formation d'étoiles	62
11.1 Imagerie H α	62
11.2 Imagerie ultraviolette	64
11.3 Morphologie atomique et moléculaire des gaz	65

12 Observations infrarouges : Morphologie de la masse stellaire galactique	69
13 Morphologie des galaxies à redshift intermédiaire et élevé	74
14 galaxies géantes à faible luminosité de surface	81
15 Morphologie de la galaxie en couleur	83
15.1 Galaxies normales	83
15.2 Galaxies naines	85
15.2.1 Galaxies dE, dS0, BCD et cE	85
15.2.2 Sphéroïdaux et irréguliers nains du groupe local	87
15.2.3 Spirales naines	88
15.3 Projet Zoo Galactique	89
15.4 Galaxies isolées	91
15.5 Imagerie couleur en champ profond	93
16 Classification automatisée des galaxies à grande échelle	93
17 Le statut et l'avenir des études morphologiques	94

1. Introduction

Au cours des près de 100 ans qui se sont écoulés depuis que la morphologie des galaxies est devenue un sujet de recherche, de nombreuses a été appris sur la structure et la dynamique galactique. Connue uniquement sous le nom de « nébuleuses » à cette époque, on a découvert que les galaxies avaient un large éventail de formes largement inexplicables dont les relations entre eux étaient un mystère. Au fur et à mesure que les données s'accumulaient, il devint clair que les galaxies sont des unités fondamentales de matière dans l'espace, et une compréhension de la façon dont elles se sont formées et évolué est devenu l'un des objectifs majeurs des études extragalactiques. Même à l'ère de l'espace observations, la morphologie des galaxies continue d'être l'épine dorsale de la recherche extragalactique car les instruments modernes fournissent des informations sur la structure galactique à travers un large éventail de distances et temps d'analyse.

Malgré les progrès de l'instrumentation et l'explosion des données, les galaxies classiques morphologie (c'est-à-dire la classification morphologique visuelle dans le style de Hubble et autres) n'a pas perdu de sa pertinence. Les raisons en sont les suivantes :

1. La morphologie reste un point de départ logique pour comprendre les galaxies. Trier les galaxies dans leurs catégories morphologiques est similaire au tri des étoiles en types spectraux, et peut conduire à des informations astrophysiques importantes. Toute théorie de la formation et de l'évolution des galaxies Il faudra, à un moment donné, rendre compte de l'éventail ahurissant de formes galactiques.
2. La morphologie des galaxies est fortement corrélée à l'histoire de la formation des étoiles galactiques. Galaxies où la formation des étoiles a cessé il y a des gigaannées ont tendance à être très différentes de celles où les étoiles se sont formées. la formation se poursuit à l'heure actuelle. La morphologie classique reconnaît ces différences de manière ordonnée.
3. Informations sur la morphologie des galaxies, sous forme de nouveaux types de galaxies, multi-longueurs d'onde des vues de types de galaxies précédemment connus et des vues à plus haute résolution de tout ou partie de certaines galaxies, a explosé à mesure que l'instrumentation moderne a remplacé l'ancienne photographie

plaques qui étaient autrefois utilisées exclusivement pour la classification des galaxies.

4. La classification des galaxies a dépassé le domaine de quelques milliers de galaxies.

d'un million de galaxies grâce au projet Galaxy Zoo. Non seulement cela, mais GalaxyZoo a

morphologie issue de la pratique exclusive de quelques experts au grand public,

faciliter la science citoyenne à son meilleur. Les images du Galaxy Zoo sont également en couleur, permettant ainsi

la reconnaissance de types et de caractéristiques de galaxies spéciales basées sur des populations stellaires ou gazeuses
émission.

5. Enfin, les études approfondies réalisées avec le télescope spatial Hubble ont étendu les études morphologiques.

des études bien au-delà du domaine des galaxies proches qui dominaient les premiers catalogues,

permettant de distinguer une morphologie détaillée à des redshifts sans précédent.

Aujourd'hui plus que jamais, la morphologie des galaxies est un sujet passionnant qui continue d'actualité.

fournir des surprises alors que de plus en plus de galaxies sont étudiées pour leurs caractéristiques morphologiques à travers

le spectre électromagnétique. Il est clair qu'une variété d'effets sont derrière observés

morphologies, y compris la densité environnementale et l'historique des fusions/interactions, internes

perturbations, accrétions de gaz, activité nucléaire, évolution séculaire, ainsi que la diversité des

l'histoire de la formation des étoiles, et qu'une perspective globale basée sur un grand nombre de galaxies

améliorera les modèles théoriques et donnera une image plus fiable de l'évolution galactique.

Le but de cet article est de présenter la phénoménologie de la morphologie des galaxies

de manière organisée, et mettent en évidence les progrès récents dans la compréhension des facteurs qui influencent

morphologie et comment les différents types de galaxies sont interprétés. L'article est une suite naturelle

à l'excellente revue de la morphologie et de la classification des galaxies par Sandage (1975) dans

Volume IX de la série classique Stars and Stellar Systems. Il complète également le récent

publié l'Atlas des Galaxies de Vaucouleurs (Buta, Corwin, & Odewahn 2007, ci-après le

dVA), qui a fourni un examen détaillé de l'état et de la technique de classification des galaxies

jusqu'à environ 2005. Les illustrations sont très importantes dans une revue de cette nature,

et l'article s'appuie sur un grand nombre de sources d'images. A cet effet, le Sloan Digital Sky Survey (SDSS), la base de données extragalactique NASA/IPAC (NED) et le dVA ont été des plus utiles.

2. Aperçu

En tant qu'objets étendus plutôt que sources ponctuelles, les galaxies présentent une grande variété de formes, certains dus à des structures intrinsèques, d'autres à la façon dont la galaxie est orientée par rapport à la ligne de vue. Les orientations aléatoires et la large répartition des distances sont les principaux facteurs cela peut compliquer les interprétations de la morphologie des galaxies. Si nous pouvions voir chaque galaxie le long de son axe principal de rotation, et à partir de la même distance, des comparaisons alors plus justes serait possible. Néanmoins, les morphologies observées dans les galaxies de face peuvent aussi souvent être reconnu dans les galaxies plus inclinées (Figure 1). Ce n'est que pour les inclinaisons les plus élevées que la morphologie passe d'une structure radiale frontale à une structure verticale. En général, soit nous connaissons la structure planaire d'une galaxie, ou nous connaissons sa structure verticale, mais nous avons généralement ne peut pas bien connaître les deux à partir de la seule analyse d'images.

La morphologie des galaxies a commencé à devenir intéressante lorsque le « Léviathan de Parsonstown », le télescope méridien de 72 pouces construit dans les années 1840 par William Parsons, troisième comte de Rosse, sur le terrain du château de Birr en Irlande, a révélé des motifs en spirale dans de nombreux les «nébuleuses» Herschel et Messier plus brillantes. La nature de ces nébuleuses en tant que galaxies n'était pas entièrement connu à l'époque, mais le soupçon général était qu'il s'agissait de systèmes stellaires. («univers insulaires») comme la Voie Lactée, trop lointains pour être facilement résolus dans leur étoiles individuelles. En fait, l'une des motivations de Parsons pour construire le « Léviathan » était pour essayer de résoudre les nébuleuses pour prouver cette idée. Le télescope n'a pas réussi à le faire de manière convaincante mais la découverte de la structure spirale elle-même était très importante parce qu'une telle structure ajouté à la mystique des nébuleuses. La forme en spirale n'était pas un motif aléatoire et avait

être significatif dans ce qu'il signifiait. Le télescope n'était pas capable de photographier, et les observateurs ne pouvaient restituer ce qu'ils voyaient que sous forme de croquis. Le plus célèbre croquis, celui de M51 et de son compagnon NGC 5195, a été largement reproduit dans manuels d'introduction à l'astronomie.

Même si les observations visuelles pourraient révéler certains aspects importants de la morphologie des galaxies, la première classification des galaxies était basée sur des plaques photographiques prises dans la région bleue du spectre. Les plaques d'émulsion sèche au bromure d'argent étaient la base de l'astronomie à partir du années 1870 et étaient relativement plus sensibles à la lumière bleue qu'à la lumière rouge. Plus tard, des photographies prises avec les plaques Kodak 103a-O et IIa-O sont devenues la norme pour la classification des galaxies. Dans cette partie du spectre, des amas d'étoiles massifs, dominés par les classes spectrales O et B les étoiles, sont proéminentes et souvent vues tapisser les bras spiraux des galaxies. Ces grappes, avec l'extinction due à la poussière interstellaire, peut donner aux images en lumière bleue beaucoup de structure détaillée pour la classification. Ce sont ces types de photographies qui ont conduit à la galaxie systèmes de classification en usage aujourd'hui.

Sur ces photographies, nous voyons de nombreuses galaxies comme un mélange de structures. Galaxies inclinées révèlent la forme omniprésente du disque, le sous-composant le plus aplati de toutes les galaxies. Études des changements de longueur d'onde Doppler dans les spectres des objets disques (comme les régions HII et lumière étoilée intégrée) révèlent que les disques tournent différemment. Si une galaxie est spirale, le disque est généralement là où se trouvent les bras, et aussi là où se trouve la majeure partie de la matière interstellaire. Le profil de luminosité radial d'un disque est généralement exponentiel, avec des écarts par rapport à un exponentielle étant due à la présence d'autres structures.

Dans la zone centrale d'une galaxie en forme de disque, on trouve aussi souvent une lumière brillante et parfois concentration de masse moins aplatie sous la forme d'un renflement. La nature des renflements et comment ils Le formulaire a fait l'objet de nombreuses recherches récentes et est abordé plus en détail dans la section 9. Disque les galaxies vont de pratiquement sans renflement à dominées par des renflements. Au centre, il peut aussi y avoir

- dix -

un noyau bien visible, une concentration centrale brillante qui était généralement perdue à cause d'une surexposition en photographies. Les noyaux peuvent être dominés par la lumière des étoiles ordinaires, ou peuvent être actifs, ce qui signifie leurs spectres montrent des signes de mouvements violents de gaz.

Les barres sont les perturbations internes les plus importantes observées dans les galaxies en forme de disque. UN La barre est une masse allongée souvent constituée de vieilles étoiles traversant le centre. Si la structure en spirale est présents, les bras commencent généralement près des extrémités de la barre. Bien que le plus facilement reconnaissable vu de face, les bars ont récemment suscité un grand intérêt pour les façons uniques dont ils peuvent également être détecté dans la vue de bord. Tous les bars ne sont pas exclusivement composés de vieilles stars. Dans Dans certaines galaxies sans renflement, la barre contient une quantité considérable de gaz et une formation d'étoiles récente.

Les disques allongés sont associés aux barres, appelés ovales. Les ovales diffèrent généralement de les barres manquent de composantes de Fourier d'ordre supérieur (c'est-à-dire qu'elles ont des distributions d'intensité azimutales qui varient principalement en 2θ), mais peuvent néanmoins constituer des perturbations majeures dans un disque galactique. Le disque entier d'une galaxie peut être ovale, ou une partie de celui-ci peut être ovale. Les disques ovales sont les plus facilement détecté s'il y a beaucoup de lumière ou de structure à des rayons plus grands.

Les anneaux sont des éléments importants dans certaines galaxies. Souvent défini par la formation récente d'étoiles, les anneaux peuvent être des éléments complètement fermés ou peuvent être partiels ou ouverts, ces derniers étant appelés «pseudorings». Les anneaux peuvent être étroits et pointus ou larges et diffus. C'est particulièrement Il est intéressant de noter que plusieurs types d'anneaux sont visibles et que certaines galaxies peuvent en avoir autant comme quatre caractéristiques d'anneau reconnaissables. Les anneaux nucléaires sont les plus petits anneaux et sont généralement observé au centre des galaxies barrées. Les anneaux intérieurs sont des éléments d'échelle intermédiaire qui sont souvent envelopper le bar dans une galaxie barrée. Les anneaux extérieurs sont de grandes caractéristiques de faible luminosité de surface qui se situent généralement à environ deux fois le rayon d'une barre. Autres types d'anneaux, appelés accréton les anneaux, les anneaux polaires et les anneaux de collision, sont également connus mais sont beaucoup plus rares que les anneaux intérieurs, anneaux externes et nucléaires de galaxies barrées. Ces derniers types de bagues ne sont pas non plus exclusifs aux galaxies barrées, mais peut également être trouvé dans les galaxies non barrées.

Les lentilles sont des éléments, généralement constitués d'étoiles anciennes, qui présentent un faible gradient de luminosité. intérieur à un bord tranchant. Ils sont couramment observés dans la classe S0 en forme de disque de Hubble (section 5.2). Si une barre est présente, la barre peut remplir une lentille dans une dimension. Les verres peuvent être ronds ou de forme légèrement elliptique. S'ils étaient de forme elliptique, ils seraient également considérés comme des ovales.

Les barres nucléaires sont les petites barres parfois observées au centre des galaxies barrées, souvent se trouvant dans un anneau nucléaire. Lorsqu'elle est présente dans une galaxie barrée, la barre principale est appelée la « barre primaire » et la barre nucléaire est appelée « barre secondaire ». Il est possible pour un nucléaire barre existe en l'absence de barre principale.

Les bandes de poussière sont souvent visibles sur les images optiques des galaxies spirales et peuvent apparaître extrêmement régulier et organisé. Ils sont plus facilement visibles dans les disques sur tranche ou très inclinés. galaxies, mais sont toujours détectables en vue frontale, souvent sur les bords d'attaque des barres ou des les côtés concaves de solides bras spiraux intérieurs.

Les bras spiraux peuvent également présenter des variations morphologiques considérables. Les spirales peuvent être régulières Des modèles à 1, 2, 3 ou 4 bras, et peuvent également être des modèles à plusieurs bras d'ordre supérieur. Spirales peut être étroitement enveloppé (angle d'inclinaison faible) ou très ouvert (angle d'inclinaison élevé). La spirale est un modèle global bien défini, souvent détectable sous forme de variations douces de l'espace stellaire. densité des anciennes étoiles du disque. Une spirale floculente est constituée de petits morceaux de structure en spirale qui semblent cisailés par rotation différentielle. Leur apparence peut être fortement affectée par poussière, de sorte qu'à des longueurs d'onde plus longues, une spirale floculente peut apparaître plus grandiose. Les pseudo-anneaux peuvent être considérés comme des spirales à angle de pas variable qui se ferment sur elles-mêmes, comme opposé à une ouverture continue, un angle de pas constant, des spirales logarithmiques.

Il existe également de nombreuses structures en dehors du cadre de la classification traditionnelle des galaxies, souvent lié à de fortes interactions entre galaxies. De plus, ce qui est décrit ci-dessus les caractéristiques ne sont pas nécessairement applicables ou pertinentes à ce que nous voyons dans des galaxies très lointaines. Prendre en compte toutes les caractéristiques observées des galaxies proches et tenter de les connecter

ce que nous voyons à proximité de ce qui est vu à un redshift élevé, est un objectif majeur de l'étude morphologique. études.

3. Classification des galaxies

Comme l'a noté Sandage (1975), la première étape dans l'étude d'une classe d'objets est une classification de ces objets. Classification construite autour d'un petit nombre de Ces caractéristiques peuvent être utilisées pour trier les galaxies en catégories fondamentales, qui peuvent constituera alors la base de recherches ultérieures. À partir de ces recherches, les relations physiques entre des classes identifiées peuvent émerger, et ces relations peuvent favoriser une interprétation théorique qui place toute la classe d'objets dans un contexte global. Il ne fait aucun doute qu'un tel Cette approche a grandement contribué au développement de la science de la biologie, et ce n'est pas vrai. moins vrai pour les galaxies.

La genèse de la classification des galaxies consiste à considérer les combinaisons complexes de structures décrits dans la section précédente et résumez-les avec quelques symboles de type. Sandage (1975) décrit les systèmes de classification antérieurs de Wolf, Reynolds, Lundmark et Shapley. qui est tombé en désuétude il y a plus de 50 ans. Le type/concentration spectrale de Morgan (1958) système de classification, qui reposait sur une connexion entre la morphologie (en particulier concentration centrale) et le contenu stellaire des régions centrales, a été utilisé récemment par Bershad, Jangren et Conselice (2000) de manière essentiellement quantitative (voir aussi Abraham et coll. 2003). Ainsi, le système de Morgan a, d'une certaine manière, survécu jusqu'à l'ère moderne, mais pas à l'époque moderne. la forme purement visuelle qu'il propose. Un seul type de galaxie Morgan, la supergéante CD type, est encore largement utilisé (section 10.6). Luminosité/morphologie du bras de Van den Bergh Le système de classification est décrit par van den Bergh (1998 ; voir la section 6.5).

Le grand survivant des premiers systèmes de classification visuelle était celui de Hubble (1926,

1936), révisé et développé ultérieurement par Sandage (1961) et de Vaucouleurs (1959).

Sandage (1975) a soutenu que l'une des raisons pour lesquelles le point de vue de Hubble a prévalu est qu'il n'a pas essayé de rendre compte de chaque détail superficiel, mais il a gardé ses cours suffisamment larges pour que la grande majorité des galaxies pourraient être triées dans l'un des bacs proposés. Ces bacs étaient

illustré schématiquement dans le célèbre « diapason » de Hubble² (Hubble 1936 ; reproduit sur la figure 2) reconnaissant une séquence d'aplatissements progressifs allant des elliptiques aux spirales.

Les vélos elliptiques n'avaient que deux détails de classification : la répartition de la luminosité qui décline progressivement sans inflexions et sans preuve de disque ; et l'ellipticité des isophotes, indiquée

par un chiffre après le symbole « E ». (Par exemple, E3 signifie que l'ellipticité est de 0,3.) Spirales

étaient des systèmes plus aplatis qu'une galaxie E7 qui pouvait être subdivisée selon la

degré de concentration centrale, degré d'ouverture des bras, degré de résolution

des bras en complexes de formation d'étoiles (les trois critères déterminant la position le long

la fourchette), et sur la présence ou l'absence d'une barre (détermination de la branche appropriée du

la fourchette).

La classe S0 à la jonction des branches de la fourche était encore hypothétique en 1936.

En tant que « galaxies à disques sans bras », les S0 étaient mystérieuses car tous les exemples connus en 1936 étaient des galaxies à disques sans bras.

barré. Ceux-ci ont été classés comme SBa, mais il s'agissait d'une incohérence troublante car

les galaxies Sa non barrées avaient des motifs en spirale complète. Hubble a prédit l'existence de personnes non interdites

Des S0 pour combler le fossé entre le type E73 et le Sa et guérir ce qu'il considérait comme un « cataclysmique »

²Comme l'a récemment noté DL Block (Block et al. 2004a), ce diagramme a peut-être été inspiré d'un schéma similaire de Jeans (1929).

³ van den Bergh (2009a) montre que les galaxies E0-E4 sont en moyenne plus lumineuses que les galaxies E0-E4. sont des galaxies E5-E7, ce qui suggère que toutes les galaxies E7 (et peu ont été reconnues) sont en réalité des galaxies S0. Van den Bergh affirme que les véritables galaxies E pourraient n'exister plus aplati que E6.

transition.

Il ne fallut pas longtemps avant que Hubble lui-même se rende compte que le diapason ne pouvait pas correctement représenter toute la diversité des morphologies des galaxies, et après 1936, il travailla sur une révision qui comprenait des exemples réels du groupe recherché : les galaxies S0 non barrées. Basé sur notes fragmentaires qu'il a laissées derrière lui, Sandage (1961) a préparé l'Atlas des Galaxies de Hubble pour illustrer la révision de Hubble, et a également ajouté une troisième dimension : la présence ou l'absence d'un anneau. Il s'agit du premier grand atlas de galaxies illustrant un système de classification de manière détaillée et détaillée. manière sophistiquée avec des photographies magnifiquement produites. La révision de Hubble, avec van den Bergh (Sandage & Tammann 1981) ont été mises à jour et étendues aux types plus tard que Sc par Sandage & Bedke (1994).

Parce que Sandage (1961) et Sandage & Bedke (1994) décrivent le système Hubble-Sandage révision si approfondie que les détails ne seront pas répétés ici. Au lieu de cela, l'accent est mis sur la prochaine section portera sur la révision de Vaucouleurs telle que décrite dans le dVA. Les raisons pour cela sont : (1) la classification de Vaucouleurs fournit les types de galaxies les plus familiers aux chercheurs extragalactiques, principalement en raison de l'utilisation continue et intensive du Troisième Catalogue de référence des galaxies brillantes (RC3, de Vaucouleurs et al. 1991) ; et (2) la classification de Vaucouleurs continue d'évoluer pour couvrir plus de détails sur la morphologie des galaxies considéré comme important à cette époque. Il convient de noter que tant les de Vaucouleurs que Les révisions de Hubble-Sandage ne sont strictement applicables qu'aux galaxies $z \approx 0$ et c'est souvent le cas. difficile d'insérer clairement les objets ayant $z > 0,5$ dans les catégories définissant ces classifications systèmes. La morphologie des galaxies à fort redshift est décrite dans la section 13.

4. Un continuum de formes galactiques

Le diapason de Hubble est utile car il fournit une représentation visuelle de l'information que Hubble (1926) n'avait énoncée qu'avec des mots. Le fork contient une implication de continuité. Par exemple, cela n'exclut pas qu'il puisse y avoir des galaxies intermédiaires en caractéristiques entre une spirale "Sa" ou "Sb", ou entre une spirale normale "S" et une spirale « SB » barrée. La continuité le long de la séquence elliptique des galaxies a toujours été implicite. variation douce des elliptiques rondes (E0) aux elliptiques les plus aplaties (E7). Sandage (1961) décrit les modifications qui ont rendu le système Hubble plus tridimensionnel : l'introduction des sous-types (r) (anneau intérieur) et (s) (spirale pure). Continuité même avec cette caractéristique était possible en utilisant le sous-type combiné (rs). Ainsi, dès 1961, le système de classification de Hubble était devenu beaucoup plus compliqué qu'il ne l'était en 1926 ou 1936. L'ajout de la classe S0 en était une des raisons, mais les sous-types (r) et (s) en étaient un autre.

Dans la classification Hubble-Sandage, il est devenu courant de désigner les galaxies situées sur la partie gauche de la séquence de Hubble comme galaxies de « type précoce » et celles de la partie droite comme galaxies de « type tardif ». De la même manière, les spirales Sa et SBa sont devenues des « spirales de type précoce ». tandis que les spirales Sc et SBc sont devenues des « spirales de type tardif ». Les types Sb et SBb sont devenus connus comme des « spirales de type intermédiaire ». La raison de ces terminologies était la commodité et emprunte la terminologie souvent utilisée pour les étoiles. Étoiles jeunes et massives des classes spectrales O et B étaient connues sous le nom d'« étoiles de type précoce », tandis que les étoiles plus anciennes de types spectraux plus froids étaient connues comme « étoiles de type tardif ». Hubble a déclaré que son utilisation de ces descriptions temporelles pour les galaxies n'avait aucune implication évolutive. Ce qui est ironique, c'est qu'il est finalement devenu évident que les galaxies de type précoce sont dominées par des étoiles de type tardif, tandis que les galaxies de type tardif ont souvent des étoiles de type tardif. un nombre important d'étoiles de type précoce.

De Vaucouleurs (1959) a poussé l'idée de continuité de la morphologie des galaxies un peu plus loin.

en développant ce qu'il appelle le volume de classification (Figure 3). Dans cette révision de la classification Hubble-Sandage (1961), la morphologie des galaxies représente un séquence de formes dans un volume tridimensionnel avec un axe long et des sections circulaires de taille variable. Le grand axe du volume est la scène, ou le type, et il représente le long axe du diapason original de Hubble. Les axes courts sont la famille et la variété, qui se réfèrent respectivement à la résistance apparente de la barre et à la présence ou à l'absence d'un anneau intérieur. Dans En plus des étapes originales de Hubble E, Sa, Sb et Sc, le volume de classification comprend nouveaux stades : elliptiques tardives : E+, spirales « très tardives » : Sd, « spirales magellaniques » : Sm, et « Irréguliers magellaniques » : Im. La classe S0 est incluse à la même position le long du séquence, entre E et spirales, mais est subdivisée en trois étapes. Les caractéristiques la définition des étapes individuelles est décrite plus en détail dans la section 5.2.

L'étape est considérée comme la dimension la plus fondamentale du volume de classification car les paramètres physiques mesurés, tels que les indices de couleur intégrés, la surface moyenne les luminosités et la teneur en hydrogène neutre sont bien corrélées à la position le long de la séquence (par exemple, Buta et al. 1994). Les galaxies de type précoce ont tendance à avoir des couleurs plus rouges, une moyenne plus élevée luminosité de la surface et teneur en hydrogène neutre inférieure à celle des galaxies de type tardif. Le Les axes familles et variétés du volume de classification indiquent les variations considérables des morphologie à un stade donné. Un célèbre croquis de familles et de variétés proches du stade Sb, dessiné par de Vaucouleurs lui-même lors d'une nuit nuageuse à l'Observatoire McDonald vers 1962, est montré dans Sandage (1975) et dans la figure 1.13 du dVA. Le volume de classification est plus large au milieu par rapport aux extrémités car la diversité de la morphologie des galaxies est la plus grande à des étapes comme S0/a et Sa. Les barres et les anneaux sont souvent les plus distincts et les plus reconnaissables à ces étapes. De telles caractéristiques ne sont pas caractéristiques des galaxies E, le volume doit donc être étroit à cette extrémité. Le long de la séquence S0, les barres et les anneaux sont à peine développés parmi les les premiers S0 (S0-) et bien développés parmi les S0 tardifs (S0+), le volume commence donc élargir. Parmi les galaxies de type très tardif, Sd, Sdm, Sm et Im, les barres sont en réalité très

fréquents, mais les anneaux fermés (r) ne le sont pas. Ainsi, le volume se rétrécit également à cette extrémité.

Aux fins d'illustration de la morphologie, images numériques en lumière bleue converties en unités des grandeurs par arcseconde carrée sont utilisées lorsqu'elles sont disponibles. Cette approche est décrite dans le dVA, et nécessite un calibrage des images, généralement basé sur des données photoélectriques publiées. photométrie multi-ouvertures. De plus, certaines des illustrations utilisées (notamment dans la section 15) proviennent du Sloan Digital Sky Survey ou d'autres sources. Ce ne sont pas les mêmes unités mais fournissent toujours d'excellentes illustrations de la morphologie. Les images couleur SDSS diffèrent de Images dVA principalement dans les régions centrales, où les images SDSS perdent parfois des détails.

Contrairement au dVA, la portée de cet article s'étend au-delà du traditionnel UBV RI bandes d'ondes. Ce n'est qu'au cours des 20 dernières années que des informations morphologiques significatives a été obtenue pour les galaxies en dehors de ces bandes, principalement dans l'ultraviolet moyen et lointain et longueurs d'onde infrarouge moyenne provenant d'observatoires spatiaux capables d'imagerie dans ces longueurs d'onde à des profondeurs sans précédent, offrant une nouvelle vision de la morphologie des galaxies qui ne fait que commencer à explorer. Une revue utile de nombreuses questions de morphologie est fournie par van den Bergh. (1998).

5. Types de galaxies : scène, famille et variété

5.1. Galaxies elliptiques et sphéroïdales

Les galaxies elliptiques sont des systèmes lisses et amorphes avec une distribution de la luminosité et aucune cassure, inflexion, zone ou structure, ainsi qu'aucun signe de un disque. La figure 4 montre quelques bons exemples. Parce que les vélos elliptiques sont dominés par de vieilles étoiles et sont relativement exempts de poussière, ils se ressemblent à différentes longueurs d'onde. celui de Hubble sous-classification des elliptiques selon l'ellipticité apparente (E_n , où $n=10(1-b/a)$, b/a étant l'aplatissement apparent) était utile mais pratiquement aucune caractéristique physique de

les elliptiques sont en corrélation avec ce paramètre (Kormendy & Djorgovski 1989). La valeur n dans la classification E_n est simplement l'ellipticité projetée et n'est pas facile à interpréter en termes d'un véritable aplatissement sans connaissance directe de l'orientation des plans de symétrie. On pense que les elliptiques lumineux ont une structure triaxiale avec une vitesse anisotrope tenseur de dispersion, tandis que les elliptiques à faible luminosité sont des rotateurs oblates plus isotropes (Davies et al. 1983). Études de l'énergie cinétique rotationnelle à aléatoire (V/σ) par rapport à l'énergie apparente l'aplatissement (q) montre que les elliptiques massifs sont des rotateurs anisotropes lents. Les vélos elliptiques suivent une relation plane fondamentale entre le rayon effectif r_e de la distribution lumineuse, le dispersion de la vitesse centrale σ_0 , et luminosité de surface effective moyenne $\langle I_e \rangle$ (voir revue par Kormendy et Djorgovski 1989). Les galaxies elliptiques naines pourraient ne pas suivre la même relation comme des vélos elliptiques massifs ; ceci est discuté par Ferguson & Binggeli (1994).

Le manque de signification fondamentale de la classification E_n de Hubble a conduit certains auteurs à rechercher une approche alternative, plus utile physiquement. Kormendy & Bender (1996 ; voir également la revue de Schweizer 1998) a proposé une révision de la poignée du diapason de Hubble qui ordonne les vélos elliptiques en fonction de leur anisotropie de vitesse, car il s'agit d'un facteur significatif déterminant des formes intrinsèques de la galaxie E . L'anisotropie de vitesse est en corrélation avec les écarts des isophotes de la galaxie E à partir de formes elliptiques pures, mesurées par le paramètre a_4/a , le amplitude relative du terme de Fourier $\cos 4\theta$ de ces écarts. Si cette amplitude relative est positif, alors les isophotes sont des ovales pointus et disques, tandis que s'ils sont négatifs, les isophotes sont ovales carrés. Un vélo elliptique carré est classé $E(b)$, tandis qu'un vélo elliptique à disque est classé comme $E(d)$. La corrélation avec l'anisotropie est telle que les galaxies $E(b)$ ont moins de rotation sur Anisotropie de vitesse moyenne et supérieure à celle des galaxies $E(d)$.

La classification proposée par Kormendy & Bender est présentée à la figure 5, avec deux exemples exceptionnels qui montrent les formes isophotes caractéristiques. Le plus à gauche de ces deux-là, NGC 7029, est un elliptique carré inhabituellement évident à des rayons plus grands. Cette boîte

constitue la base de la classification E(b)5. Cependant, NGC 7029 n'est pas carré partout : il montre la présence d'un petit disque interne et est donc disque à petits rayons. Ce n'est pas nécessairement pris en compte dans le classement. L'autre image présentée sur la figure 5 est NGC 4697, une galaxie dont les isophotes sont visuellement disquaux. L'idée avec le Kormendy & La classification de Bender est que ce sont les disques elliptiques qui se connectent aux galaxies S0, et non les vélos elliptiques carrés. Cependant, NGC 7029 démontre que le disque et le carré peuvent être une fonction du rayon, donc peut-être une connexion fluide entre les types E(b) et E(d) [c'est-à-dire, type E(b,d)] est possible et l'ordre indiqué dans la révision Kormendy & Bender du Le diapason de Hubble, avec des Es carrés se mélangeant aux Es disquaux, pourrait être raisonnable.

Notez que même si les classifications En classiques des vélos elliptiques ont été conçues par Hubble pour être estimé à l'œil nu, cela n'est pas facile à faire pour les classifications E(b) et E(d), qui sont il est préférable de ne le voir que lorsque le disque est presque sur la tranche. Es face à face avec intégré les disques n'afficheront pas les isophotes du disque. Par exemple, NGC 7029 et 4697 sont des cas extrêmes où les écarts isophotiques sont évidents à l'œil nu. Mais pour la plupart des galaxies E, les valeurs E(b)n et Les classifications E(d)n ne peuvent être jugées de manière fiable qu'avec des mesures du paramètre a_4/a .

La classification de Vaucouleurs des vélos elliptiques comprend un type légèrement plus avancé appelés E+, ou elliptiques « tardifs ». Il était initialement prévu de décrire « la première étape de le passage à la classe S0 » (de Vaucouleurs 1959). Cinq exemples de galaxies E+ sont illustré dans la deuxième rangée de la figure 4. Les galaxies classées E+ peuvent être les S0 les plus subtiles, mais bon nombre des cas E+ répertoriés dans RC3 sont les membres les plus brillants des clusters qui ont profils de luminosité suffisamment peu profonds pour sembler avoir une enveloppe étendue (voir la section 10.6). Parmi les cinq galaxies E+ présentées, seule NGC 4623 (type rare E+7) semble cohérente avec le point de vue original de de Vaucouleurs. C'est également un système de luminosité beaucoup plus faible que le quatre autres cas présentés. Alors que S0- est le type le plus souvent confondu avec les elliptiques en visualisation classification, la poubelle a une large répartition des cas les plus évidents aux cas les moins évidents.

Ainsi, un type comme E+ est toujours utile pour distinguer les transitions des galaxies E vers S0.

Les propriétés photométriques des appareils elliptiques dépendent de la luminosité. En termes de Sersic $r^{-1/n}$ les profils s'adaptent, les grands vélos elliptiques lumineux ont tendance à avoir des profils mieux décrits par $n=4$, tandis que les elliptiques plus petits et à faible luminosité ont tendance à avoir $n < 4$, avec des valeurs aussi basses que 1 (par exemple, Caon, Capaccioli et D'Onofrio 1993). Graham & Guzmán (2003) discutent des implications de cette corrélation sur les dichotomies proposées des galaxies elliptiques (par exemple, Kormendy 1985 ; voir également Ferrarese et al. 2006). Ces études ont reçu une impulsion majeure de la part du analyse photométrique des galaxies elliptiques de l'amas de la Vierge par Kormendy et al. (2009). Deux questions ont été considérées par ces auteurs (Figure 6). La première était de savoir si les galaxies classés comme elliptiques nains (« dE » ; voir section 15.2) dans l'amas de la Vierge sont en réalité les extension à faible luminosité d'elliptiques conventionnels plus massifs, ou quelque chose de différent tout à fait. Sur la base de corrélations de paramètres, telles que $r_{10\%}$, le rayon du grand axe du isophote contenant 10 % de la luminosité visuelle totale, contre $\mu_{10\%}$, la luminosité de la surface de cet isophote, Kormendy et al. montrent que même les plus elliptiques et les plus lumineux Les galaxies dE se trouvent sur une séquence distincte des galaxies elliptiques normales, qui ont tendance à se situer sur une séquence de densité plus élevée. Dans un graphique de la luminosité de la surface centrale de la bande B en fonction de magnitude absolue de la bande B, les galaxies dE se trouvent dans une région occupée par des galaxies irrégulières de Magellan. galaxies, suggérant un lien entre les groupes et cohérent avec les conclusions précédentes de Kormendy (1985). Kormendy et coll. (2009) suggèrent de reclasser Binggeli, Sandage et Les galaxies « dE » de Tammann (1985) et les objets associés (comme les galaxies naines S0 ou dS0) comme galaxies « sphéroïdales » (Sph), y compris le type « Sph,N », signifiant « sphéroïdale nucléée » galaxie (section 15.2). La figure 6 montre plusieurs exemples de galaxies Sph,N comparées à plusieurs véritables galaxies elliptiques. L'aspect morphologique seul ne suffit pas nécessairement distinguer les deux classes. La classification est physique et repose principalement sur des paramètres corrélations. Kormendy et coll. suggèrent que les galaxies Sph sont formées à partir de systèmes de type tardif par les effets environnementaux et les supernovae.

La deuxième question examinée était la distinction physique entre les appareils elliptiques « de base » galaxies, celles où le profil de luminosité de la surface s'approche soit d'un niveau constant, soit d'un niveau légèrement incliné avec un rayon proche de zéro et des elliptiques « sans noyau » (également appelés comme « loi de puissance » E_s) où le profil intérieur s'accroît avec un rayon décroissant (Kormendy 1999). Kormendy et coll. (2009) ont illustré les deux types par rapport à un ajustement Sersic $r \propto r^{-1}$ au r des régions extérieures des profils de luminosité. Dans cette représentation, les E_s centraux sont une « lumière manquante » par rapport à l'ajustement, tandis que les E_s sans noyau sont « extra légers ». La rangée supérieure de la figure 6 montre un noyau E (NGC 4472) et deux E_s sans noyau [NGC 4458 et IC 798 (VCC 1440), ce dernier un nain à faible luminosité]. Les distinctions subtiles sont évidentes sur ces images, avec NGC 4472 montrant un centre mou et NGC 4458 montrant un centre fort. La terminologie pour les deux types sont pour la plupart historiques (Kormendy 1999) et quelque peu contraire à l'impression visuelle (c'est-à-dire que NGC 4472 n'a pas de noyau brillant alors que NGC 4458 en a un, pourtant ce dernier est techniquement sans noyau). Kormendy et coll. montrent que les galaxies E avec et sans noyau ont des Sersiques différentes indices, anisotropie de dispersion de vitesse, formes isophotes et caractère de rotation, avec le noyau E_s étant du type boxy et les E_s sans noyau du type disk sur la figure 5. La distinction peut être liée au nombre de fusions qui ont formé le système.

5.2. Galaxies S0 et spirales

La classification complète des galaxies spirales et S0 implique la reconnaissance du stade, famille et variété. Dans l'approche de classification de de Vaucouleurs, l'implication pour les barres, anneaux intérieurs et étages est un continuum de formes (de Vaucouleurs 1959), de sorte qu'il n'y a pas des arêtes vives à n'importe quelle catégorie ou « cellule » en dehors des plus évidentes (par exemple, il y a Il n'y a pas de galaxies moins « barrées » qu'une galaxie non barrée, et il n'y a pas non plus de galaxies plus annelées qu'une galaxie non barrée. ceux avec un anneau parfaitement fermé).

La classification des galaxies S0 dépend de la reconnaissance de la présence d'un disque et d'un

renflement au minimum, et généralement une lentille également, et pas de bras en spirale. Des exemples sont présentés dans Figure 7. L'affichage des images de galaxies en unités de mag arcsec^{-2} rend les objectifs particulièrement facile à détecter, comme indiqué dans le dVA. Même si une lentille n'est pas évidente, une galaxie pourrait quand même être un S0 s'il montre la preuve d'un disque exponentiel. (Les objectifs ne sont pas non plus exclusifs aux S0.)

La caractéristique « pas de bras spiraux » est beaucoup plus stricte dans la classification Hubble-Sandage que dans l'interprétation de Vaucouleurs, car les variétés (r, rs et s) sont portées dans le de Classifications de Vaucouleurs des S0. Cela permet la possibilité d'une classification comme SA(s)0–, ce qui serait très difficile à reconnaître. Les bars entrent dans la classification des S0 de manière similaire manière comme pour les spirales. La figure 7 montre principalement les différences de stade entre les non-barrés et les barrés. S0. Le stade des S0 va du début (S0–), à l'intermédiaire (S0o), et enfin à la fin. (S0+), dans une succession de détails croissants. Les premiers S0 non interdits peuvent être confondus avec galaxies elliptiques sur des images photographiques, et en effet Sandage & Bedke (1994) notent des cas où ils pensent qu'une galaxie S0 a été classée à tort comme elliptique par de Vaucouleurs dans ses catalogues de référence (voir aussi The Revised Shapley-Ames Catalogue, RSA, Sandage & Tammann 1981). Ce type de mauvaise interprétation est moins probable pour les types S0 o et S0+, car ceux-ci auront tendance à montrer une structure plus évidente.

La distinction morphologique entre les galaxies E et S0 a été considérée depuis un point de vue cinématique quantitatif par Emsellem et al. (2007). Ces auteurs soutiennent que la division des galaxies de type précoce en types E et S0 est « artificielle » et qu'elle est plus significatif de les diviser selon un paramètre cinématique quantitatif appelé λR , le moment cinétique spécifique de la composante stellaire, dérivé d'un champ de vitesse bidimensionnel obtenu avec le spectrographe à champ intégral SAURON (Bacon et al. 2001). Sur la base de ce paramètre, les galaxies de type précoce sont divisées en galaxies lentes et les rotateurs rapides, c'est-à-dire s'ils sont caractérisés ou non par une rotation à grande échelle. Dans un échantillon de 48 types précoces, la plupart se sont avérés être des rotateurs rapides classés comme un mélange de E et S0, tandis que les autres étaient des rotateurs lents classés Es. Ce genre de

approche, qui fournit une distinction plus physique entre les premiers types, n'annule pas complètement la valeur des subdivisions E et S0, mais souligne à nouveau la persistance difficile de distinguer les premiers S0 des Es par la seule morphologie.

Le type de transition S0/a montre les débuts de la structure en spirale. Deux exemples sont inclus dans la figure 7, l'un non barré et l'autre barré. Le type S0/a est un type bien défini étape caractérisée dans le volume de classification 3D de Vaucouleurs comme ayant une forte diversité des caractéristiques familiales et variétales. Le type a reçu une caractérisation négative comme la « poubelle » de la séquence Hubble à une certaine époque, car elle était poussiéreuse et gênante. Irréguliers, ceux initialement classés comme « Irr II » par Holmberg (1950) et plus tard comme « I0 » par de Vaucouleurs, semblait mieux s'intégrer dans cette partie de la séquence. [En effet, de Vaucouleurs, de Vaucouleurs et Corwin (1976) ont attribué l'indice numérique de stade $T=0$ à la fois S0/a et galaxies I0.] Cependant, ce problème ne concerne que les longueurs d'onde optiques. Plus longtemps longueurs d'onde (par exemple, 3,6 microns), les types tels que Irr II ou I0 sont moins nécessaires car ils sont définis principalement par la poussière (Buta et al. 2010a).

En général, l'étape des spirales est basée sur l'apparence des bras spiraux (degré d'ouverture et de résolution) et également sur la proéminence relative du renflement ou du centre concentration. Ce sont les critères habituels appliqués à l'origine par Hubble (1926, 1936). La figure 8 montre la séquence des étapes pour les spirales divisées selon la classification des barres (SA, SAB, SB), et tel que modifié et étendu par de Vaucouleurs (1959) pour inclure Sd et Sm les types. Les étapes intermédiaires, telles que Sab, Sbc, Scd et Sdm, sont illustrées à la figure 9. Comme notées par de Vaucouleurs (1963), ces dernières étapes sont presque aussi fréquentes que les étapes fondamentales.

Les trois critères de Hubble sont essentiellement visibles dans les galaxies illustrées. Sa galaxies ont tendance à avoir des renflements importants et des bras en spirale étroitement enveloppés et relativement lisses. Les galaxies Sab sont similaires aux galaxies Sa, mais présentent une résolution plus évidente des bras. Sb les galaxies ont plus de résolution et plus de bras ouverts, et généralement des renflements plus petits que Sab

galaxies. Les galaxies Sbc ont une résolution et une ouverture des bras considérables, ainsi que renflements généralement importants. Dans les galaxies Sc, le renflement a tendance à être très petit et les bras inégale et ouverte. Les galaxies Scd ont tendance à être des galaxies Sc relativement sans renflement et à bras inégaux. Le stade Sd se distingue principalement par des spirales de type tardif presque complètement sans renflement avec souvent structure en spirale mal définie.

Les stades Sdm et Sm sont les stades asymétriques les plus caractéristiques, la dernière spirale types le long de la séquence Hubble révisée de de Vaucouleurs. Ils sont décrits en détail par de Vaucouleurs & Freeman (1972) et par Odewahn (1991). Sm est généralement caractérisé par pratiquement aucun renflement et un bras spiralé à principe unique. Si une barre est présente, c'est généralement pas au centre des isophotes du disque, contrairement à ce que l'on voit normalement dans les types antérieurs barrés spirales. Cela conduit au concept de galaxie barrée décalée. Le bras unique en spirale émane d'une extrémité du bar. Comme l'a noté Freeman (1975), il s'agit là d'une caractéristique fondamentale asymétrie de la distribution de masse des spirales barrées de Magellan. Les galaxies Sdm sont similaires, mais peut montrer un deuxième bras plus faible ou plus court. Dans la figure 8, NGC 4618 est un particulièrement bon exemple d'un type SBm (Odewahn 1991), tandis que sur la figure 9, NGC 4027 est illustré comme tapez SBdm.

Une question importante concernant ces galaxies est de savoir si la barre optiquement décalée est également décalé par rapport au centre de rotation dynamique du disque. Dans une étude détaillée de HI sur paire de galaxies en interaction NGC 4618 et 4625, Bush & Wilcots (2004) ont trouvé des champs de vitesse et disques HI étendus, mais pas de décalage important du centre de rotation par rapport à le centre du bar. Ceci est similaire à ce que Pence et al. (1988) trouvé pour la compensation galaxie barrée NGC 4027, basée sur l'interférométrie optique Fabry-Pérot. En revanche, les deux Les nuages de Magellan, qui sont également des galaxies barrées décalées, présentent une rotation HI. centres significativement décalés par rapport au centre de la barre (Kerr & de Vaucouleurs 1955).

En général, l'application des trois critères de Hubble en spirale permet d'obtenir des résultats cohérents.

classification des types de spirales. Néanmoins, les critères sont parfois incohérents. Pour exemple, les galaxies Sa à petit renflement sont décrites par Sandage (1961) et Sandage & Bedke (1994). Les galaxies barrées avec des anneaux nucléaires peuvent avoir des bras spiraux comme ceux d'une galaxie antérieure. Type Hubble et très petits renflements. Dans de tels cas contradictoires, l'accent est généralement mis porté sur l'apparence des armes. De plus, bien que les galaxies Sdm et Sm de type tardif soient Généralement asymétriques, d'autres types peuvent également être asymétriques. En moyenne, le Le rapport renflement/luminosité totale est lié au type de Hubble, mais le résultat est sensible à la façon dont les galaxies sont décomposées (par exemple, Laurikainen et al. 2005). L'asymétrie a été quantifiée par Conselice (1997).

Les classifications familiales SA, SAB et SB sont des estimations purement visuelles de la résistance des barres, pour les spirales et les S0. Ils sont déjà mis en évidence dans les figures 7 à 9, mais la continuité de cette caractéristique est mieux illustrée dans la figure 10, où de Vaucouleurs (1963) souligne les classifications (SAB et SAB) sont également affichées. Une galaxie SA n'a pas de barre évidente général, bien qu'une inclinaison élevée puisse entraîner une classification SA erronée si une barre est très raccourci. De plus, la poussière interne peut obscurcir une barre (voir, par exemple, Eskridge et al. 2000). Un La galaxie SB devrait avoir une barre claire et bien définie. Le classement des barres intermédiaires SAB est l'une des caractéristiques du système de Vaucouleurs et est utilisé pour reconnaître les galaxies ayant des caractéristiques intermédiaires entre les galaxies barrées et non barrées. Il est utilisé pour des ovales bien définis ou simplement des barres normales d'apparence plus faible. Les barres primaires les plus faibles sont notée SAB alors que la classification SAB est généralement attribuée à des barres plus classiques qui semblent seulement un peu plus faibles que les barres conventionnelles. La plupart du temps, les galaxies qui qui doivent être classés comme SAB sont simplement classés comme SB.

La variété est également traitée comme un paramètre de classification continu (Figure 10, deuxième ligne). Une galaxie spirale ayant un anneau intérieur complètement fermé ou presque complètement fermé est noté (r). Les bras en spirale se détachent généralement de l'anneau. Si les bras spiraux se brisent directement

à partir de la région centrale ou des extrémités d'une barre, formant un motif ouvert et enroulé en continu, la variété est(s). La variété intermédiaire (rs) est également bien définie. Anneaux intérieurs qui semblent cassés ou partiels entrent dans cette catégorie. La morphologie « tiret-point-tiret entre parenthèses » : (-o-), où une barre avec un renflement est entourée d'arcs en spirale dépassant l'axe de la barre, est très typique de la variété (rs). L'exemple illustré à la figure 10 est NGC 4548. Nous utilisons la notation rs pour désigner un anneau intérieur composé de bras en spirale étroitement enroulés qui ne ferme pas tout à fait, tandis que la notation rs est utilisée pour un intérieur très ouvert, à peine reconnaissable. pseudo-anneaux. Un bon exemple du premier est NGC 3450, tandis qu'un exemple du second est NGC5371.

Un fuseau est une galaxie à disque très incliné. Pour les images en lumière bleue, généralement un « sp » après la classification implique automatiquement une incertitude considérable dans l'interprétation, car la famille et la variété ne se distinguent pas facilement lorsque l'inclinaison est forte. La figure 11 montre cependant que les étages peuvent être jugés de manière raisonnablement fiable pour les galaxies. Un développement important dans la classification des galaxies de bord a été la capacité à reconnaître les barres de bord grâce aux formes carrées/cacahuètes et en « X ». Renflements carrés/cacahuètes dans les galaxies de bord, il a été prouvé qu'il s'agissait de barres vues de bord à partir de considérations cinématiques (par ex. par exemple, Kuijken & Merrifield 1995). Cette forme est évidente dans NGC 4425 (rangée 1, colonne 4 de Figure 11 ; voir également la section 9).

Pour les galaxies spirales et S0 qui ne sont pas trop inclinées (c'est-à-dire pas de fuseaux), une fois que le stade, la famille et la variété sont déterminés et sont combinés dans l'ordre famille, variété, étape pour un type complet final. Par exemple, NGC 1300 est de la famille SB, variété(s), et étape b, donc son type complet est SB(s)b. La galaxie S0+ NGC 4340 possède à la fois une barre et un anneau et son type complet est SB(r)0+. La classification est suffisamment flexible pour que si, par exemple, la famille et la variété d'une galaxie ne peuvent pas être déterminées de manière fiable en raison de leur forte inclinaison, pendant que l'étape peut encore être évaluée, les symboles peuvent alors être supprimés et un type tel que

« Sb » ou « S0 » peuvent encore être notés.

5.3. Galaxies irrégulières

Les galaxies irrégulières de Magellan représentent le dernier étage normal des de Vaucouleurs séquence Hubble révisée. Plusieurs exemples sont présentés sur la figure 12. Les objets illustrés dans la rangée supérieure se trouvent tous les exemples d'irréguliers de variété (s) avec des barres ou une trace de barre. Néanmoins, tous les irréguliers magellaniques n'ont pas de barres. Irréguliers des luminosités les plus basses sont généralement classés simplement comme Im puisque la sophistication de la structure est nécessaire pour distinguer quelque chose comme la « famille » n'existe peut-être pas pour de telles galaxies.

Les galaxies irrégulières sont importantes pour leurs caractéristiques de formation d'étoiles. Comme l'a noté Hunter (1997), les irrégulières sont similaires aux spirales en ce sens qu'elles contiennent à la fois des étoiles jeunes et âgées. sous forme de poussière, de gaz atomique, moléculaire et ionisé, mais n'ont pas la structure en spirale qui pourrait déclencher formation d'étoiles. Ce sont donc des laboratoires utiles pour examiner comment se produit la formation des étoiles. en l'absence de bras spiraux.

Bien que les irrégularités soient largement définies par un manque de structure bien organisée comme une spirale bras, les deux galaxies en bas à droite de la figure 12 ne sont pas si désorganisées et semblent différent des autres cas présentés. NGC 5253 ressemble presque à une galaxie S0 inclinée, pourtant, il ne présente aucun renflement en son centre ni aucune lentille évidente. Au lieu de cela, la zone centrale est un zone irrégulière de formation active d'étoiles. La zone centrale a été interprétée par van den Bergh (1980a) comme « preuve fossile » d'une explosion de formation d'étoiles, possiblement déclenchée par un interaction avec le M83 voisin. Il s'agit d'un cas où la classification de Vaucouleurs des 10 semble raisonnable : NGC 5253 est une galaxie de type précoce avec une explosion d'étoiles centrale, probablement l'exemple le plus jeune et le plus proche connu (Vanzi & Sauvage 2004). C'est un Magellan galaxie irrégulière intégrée dans un fond lisse de type S0 connue pour avoir une étoile de type précoce

spectre. NGC 1705, également illustré sur la figure 12, est similaire mais possède un amas de super étoiles à proximité le centre et les filaments particuliers évidents. Elle est classée naine bleue compacte par Gil de Paz et coll. (2003). Les deux galaxies sont classées comme amorphes par Sandage & Bedke (1994).

6. Autres dimensions de la morphologie des galaxies

Le volume de classification de Vaucouleurs reconnaît trois aspects principaux de la galaxie morphologie, mais il est clair qu'il existe bien plus de dimensions que trois. Scène, famille et variété sont les dimensions les plus clairement mises en évidence dans les images en lumière bleue et ont un large portée. D'autres dimensions peuvent être prises en compte et pour certaines, une notation explicite est utilisée.

6.1. Anneaux extérieurs et pseudo-anneaux

Les types de Vaucouleurs publiés incluent une dimension supplémentaire connue sous le nom d'extérieur. classification anneau/pseudoring. Plusieurs exemples d'anneaux extérieurs et de pseudo-anneaux sont présentés sur la figure 13. Un anneau extérieur est une grande structure souvent diffuse, généralement vue en forme de barreaux. galaxies de type précoce (stades S0+ à Sa) à un rayon environ deux fois supérieur à celui de la barre. Les anneaux extérieurs fermés sont reconnus par le symbole de type (R) précédant la partie principale du classification. Par exemple, une galaxie SB(r)0+ ayant un anneau extérieur a une classification complète de (R)SB(r)0+. Il est intéressant de noter que de rares cas de galaxies à double anneau externe, de type (RR), sont connus, où l'on voit deux anneaux extérieurs détachés ; un exemple est NGC 2273 montré en haut à gauche cadre de la figure 13.

Dans les galaxies de type plus récent, on observe souvent un grand anneau externe constitué d'une spirale externe. bras dont l'angle d'inclinaison variable les amène à se rapprocher. Ces fonctionnalités sont classées comme pseudo-anneaux externes, symbolisés par (R') précédant les symboles de type principal [par exemple, comme dans (R')SB(r)ab]. Les pseudo-anneaux externes sont principalement observés dans les galaxies Sa à Sbc et ne sont que

rarement observé aux stades très avancés Sc-Sm.

Parmi les galaxies brillantes proches, les anneaux extérieurs et les pseudo-anneaux se trouvent à peu près à la même distance. Niveau de 10 % (Buta & Combes 1996). En règle générale, les anneaux extérieurs sont plus faibles que 24 mag arcsec⁻² en lumière bleue. Avec de si faibles luminosités de surface, les anneaux peuvent facilement être perdus au profit de Galactic extinction. La division entre les anneaux extérieurs et les pseudo-anneaux n'est pas non plus nette. Certains extérieurs les pseudo-anneaux se distinguent à peine des anneaux extérieurs. La continuité s'applique à ces caractéristiques comme pour les bagues intérieures bien qu'il n'y ait pas de symbole autre que « S » pour une bague extérieure motif en spirale qui ne se ferme pas en pseudo-anneau externe.

Bien que les anneaux extérieurs fermés (R) soient également bien reconnus dans le RSA et le Atlas de Carnegie et Hubble, les pseudo-anneaux extérieurs sont une caractéristique unique des de Vaucouleurs révision. L'intérêt de reconnaître ces caractéristiques est que beaucoup présentent des morphologies cohérentes avec les attentes théoriques de la résonance externe de Lindblad (OLR, Schwarz 1981), une des résonances majeures d'ordre inférieur qui peuvent jouer un rôle dans l'évolution du disque. Anneaux de résonance sont discutés plus en détail dans la section 10.1, mais la figure 14 montre des schémas des morphologies généralement liée à cette résonance. Les schémas sont conçus pour mettre en évidence le subtil mais aspects bien définis de ces fonctionnalités, tandis que la figure 15 montre des images de plusieurs exemples de chaque morphologie, y compris les « modèles » utilisés pour le schéma. Bagues extérieures de type R1 sont des anneaux fermés légèrement alvéolés vers l'axe de la barre, une forme qui relie directement à l'une des principales familles d'orbites périodiques proches de l'OLR comme le montre Schwarz (1981) et dans le dVA. Pseudo-anneaux externes de type R' ₁ sont similaires au type R1 mais sont constitués de deux bras en spirale qui s'enroulent à environ 180° par rapport aux extrémités de la barre. Même ceux-là montrera généralement une forme alvéolée. Pseudo-anneaux externes de type R' ₂ sont différents de cela dans que deux bras en spirale s'enroulent à 270° par rapport aux extrémités de la barre, de telle sorte que les bras soient doublé dans les quadrants immédiatement après la barre.

Les formes R1, R' ₁, et R' ₂ ont été prédits par Schwarz (1981) sur la base des « particules collantes »

simulations numériques. Non prédit par ces simulations (mais montré plus tard dans les extensions de ces simulations par Byrd et al. 1994 et Rautiainen & Salo 2000) est une étude intéressante morphologie d'anneau combinée appelée $R1R'_{2,1}$, qui est constitué d'un anneau $R1$ fermé et d'un $R'_{2,1}$ pseudoring. Cette combinaison est particulièrement importante car elle démontre non seulement un continuité des morphologies entre les anneaux extérieurs et les pseudo-anneaux différente de la continuité entre les anneaux extérieurs et les pseudo-anneaux en général, mais aussi c'est une morphologie qui peut être directement lié à la dynamique des galaxies barrées.

Notez que la classification présentée dans les figures 14 et 15 ne dépend pas du fait que les anneaux sont en fait liés à l'OLR. Les morphologies illustrées sont abondantes et facilement reconnaissables quelle que soit la façon dont ils sont interprétés. (La section 10.1 traite d'autres interprétations qui ont été proposées.) Bien que les modèles Schwarz aient guidé la recherche pour ces morphologies, Rautiainen, Salo et Buta (2004) et Treuthardt et al. (2008) a montré que certains pseudo-anneaux externes classés comme $R'_{1,1}$ sont plus probablement liés à l'extérieur Résonance 4:1 et non OLR. Ces cas sont généralement reconnaissables à la présence de arcs en spirale secondaires selon un motif à quatre bras dans la zone de la barre (NGC 1433 sur la figure 1) et ESO 566-24 sur la figure 19 en sont des exemples).

Les sous-classifications OLR sont utilisées de la même manière que l'anneau extérieur uni et classifications pseudoring. Par exemple, NGC 3081 a le type complet $(R1R'_{2,1})SAB(r)0/a$.

6.2. Lentilles intérieures et extérieures

L'intérêt de reconnaître les lentilles en tant que composants morphologiques importants a été découvert pour la première fois. souligné par Kormendy (1979), qui a suggéré un lien dynamique entre les lentilles internes, qui sont souvent remplis par une barre dans une dimension, et des barres dissoutes ou dissolvantes. Kormendy noté que les lentilles peuvent être du type interne ou externe, d'une manière analogue aux lentilles internes et externes.

anneaux extérieurs. Il a suggéré la notation (l) pour les lentilles intérieures et (L) pour les lentilles extérieures afin de être utilisé dans la même position de la classification que les anneaux intérieurs et extérieurs. Par exemple, la galaxie NGC 1543 est de type (R)SB(l)0/a tandis que la galaxie NGC 2983 est de type (L)SB(s)0+.

La figure 16 montre la continuité entre les anneaux et les lentilles, qui est évidente non seulement parmi les galaxies barrées mais aussi parmi les galaxies non barrées. Cette continuité est reconnue par le symbole de type (rl), également utilisé par Kormendy (1979). Ce type fait référence à un faible contraste bague intérieure au bord d'une lentille transparente. Même les classifications soulignées (rl) et (rl) peuvent être reconnues. Une classification rare, (r' l), fait référence à un pseudo-anneau/lentille interne, un type de caractéristique cela est vu dans NGC 4314 et reconnu comme tel dans le dVA.

De même, la figure 17 montre une continuité entre les anneaux extérieurs et les lentilles extérieures à travers la classification de type (RL), faisant référence à une lentille extérieure avec une faible amélioration en forme d'anneau. Les types de soulignement RL et RL peuvent également être reconnus. L'origine des lentilles extérieures pourrait être anneaux extérieurs très évolués.

6.3. Anneaux et barres nucléaires

Les régions centrales des galaxies barrées présentent souvent des caractéristiques morphologiques distinctes. sous forme de petits anneaux et de barres secondaires. Les anneaux, appelés anneaux nucléaires en raison de leur proximité avec le noyau, bien à l'intérieur des extrémités de la barre primaire, sont des sites de certains des sursauts d'étoiles les plus spectaculaires connus dans les galaxies normales. Les anneaux sont généralement $\approx 1,5$ kpc de diamètre linéaire et de forme intrinsèquement circulaire. La figure 18 (rangée du haut) montre trois exemples : NGC 1097, 3351 et 4314. Ces images mettent en évidence les petits renflements qui semblent caractéristique des galaxies barrées aux anneaux nucléaires. Les trois galaxies illustrées ont des types allant de Sa à Sb, mais en fonction de la taille du renflement, les types seraient considérablement plus tardifs. Par exemple, NGC 3351 présente le renflement d'une galaxie Sd.

Comerón et al. (2010) ont réalisé une étude statistique approfondie des rayons des anneaux nucléaires, et identifié une sous-classe connue sous le nom d'anneaux nucléaires « ultra-compacts » (UCNR). De telles bagues ont été reconnus principalement dans les images du télescope spatial Hubble et sont définis comme étant inférieurs à 200 pièces de diamètre. (Voir la figure 26 pour un exemple dans NGC 3177.) Comerón et al. montré que les UCNr constituent la queue de petite taille de la population mondiale des anneaux nucléaires. Cette étude également ont montré que la résistance des barres a un impact sur la taille des anneaux nucléaires, les barres étant généralement plus solides. hébergeant des anneaux nucléaires plus petits que des barres plus faibles.

Comerón et al. (2010) ont également pu obtenir une estimation fiable de la part relative fréquence des anneaux nucléaires à $20 \% \pm 2 \%$ sur la plage de types S0– à Sd, confirmant avec une erreur plus petite barre le résultat précédent de Knapen (2005). En supposant que les anneaux nucléaires soient un faisant partie normale de l'évolution des galaxies, ces auteurs soutiennent que les anneaux peuvent survivre pendant 2 à 3 Gyr. Fait intéressant, il a également été constaté que $19 \% \pm 4 \%$ des anneaux nucléaires se trouvent dans des galaxies non barrées, ce qui implique soit que les anneaux peuvent s'être formés lorsqu'une barre était plus solide (preuve de la présence d'une barre évolution) ou que des ovales ou d'autres mécanismes peuvent conduire à leur formation. Mazzuca et coll. (2009 ; voir aussi Knapen 2010) relie certaines propriétés des anneaux nucléaires au taux de dont la courbe de rotation monte dans les régions intérieures.

L'anneau nucléaire le plus extrême connu se trouve dans la galaxie SBa ESO 565–11 (voir également article 7). Avec un diamètre de 3,5 kpc, c'est non seulement l'un des plus grands anneaux nucléaires connus, mais l'anneau a également une forme extrêmement allongée par rapport aux anneaux nucléaires plus typiques.

Les barres nucléaires se trouvent dans la même zone radiale que les anneaux nucléaires et se trouvent parfois à l'intérieur d'un anneau nucléaire. Trois exemples sont présentés dans la deuxième rangée de la figure 18. Ces moyennes environ un dixième de la taille d'une barre primaire. Il n'y a pas d'angle préféré entre l'axe de la barre nucléaire et la barre primaire, ce qui suggère que les deux caractéristiques ont des motifs différents (Buta & Combes 1996 ; dVA).

Ni les anneaux nucléaires ni les barres nucléaires n'étaient reconnus dans le Hubble-Sandage-de original.

classifications de Vaucouleurs, probablement en partie parce que l'utilisation de photographies à petite échelle les plaques destinées à une classification approfondie des galaxies limitaient la détectabilité des caractéristiques dans le (généralement) centres surexposés. L'imagerie numérique multibande moderne facilite grandement la détection des petits anneaux et barres, permettant leur inclusion dans le classement. Buta & Combes (1996) et Buta et al. (2010a) ont suggéré la notation nr pour les anneaux nucléaires et nb pour les barres nucléaires, respectivement, à utiliser dans le cadre de la classification variétale comme dans, pour exemple, $SB(r,nr)b$ pour NGC 3351, ou $SAB(l,nb)0/a$ pour NGC 1291. Une continuité peut exister pour ces fonctionnalités comme les autres anneaux et barres primaires. [Par exemple, les lentilles nucléaires (nl) peuvent également être reconnu.] Dans les images en lumière bleue, l'apparition de la région centrale d'une barre la galaxie peut être fortement affectée par la poussière. Par exemple, NGC 1365 montre une spirale nucléaire en lumière bleue, tandis qu'en infrarouge, la morphologie est celle d'un anneau nucléaire (Buta et al. 2010a). Les morphologies de certaines galaxies présentent un ensemble complet de caractéristiques classifiables. Par exemple, en tenant compte de tous les anneaux et barres observés dans NGC 3081, la classification est $(R1R'2)SAB(r,nr,nb)0/a$.

Lisker et coll. (2006) utilisent la terminologie « S2B » pour les galaxies à double barre, une approche alternative pour classer ces objets. Lisker et coll. nucléaire identifié avec succès barres dans les galaxies aux redshifts $z=0,10-0,15$ (à partir des observations HST ACS), les plus éloignées ceux reconnus jusqu'à présent.

6.4. Morphologies des bras en spirale

Une classification telle que « Sb » indique qu'une galaxie est une spirale d'angle d'inclinaison modéré. et le degré de résolution des bras, et qu'un renflement important peut être présent. Le type

⁴Dans une étude sur les noyaux galactiques, van den Bergh (1995) a proposé la notation « NB » pour barres nucléaires, bien que ce à quoi il fait référence ne soit pas la même chose que les caractéristiques décrites ici.

ne dit pas directement : (1) la multiplicité du motif en spirale ; (2) le caractère des armes (massif, filamenteux, grand dessin ou floclent) ; ou (3) la sensation d'enroulement des bras (en avance ou en arrière du sens de rotation). Ce sont néanmoins des dimensions supplémentaires à la morphologie des galaxies.

La multiplicité du motif en spirale fait référence au nombre réel de bras en spirale, généralement noté par l'entier m . Des exemples de spirales ayant $m = 1$ à 5 sont illustrés sur la figure 19. La multiplicité n'est pas nécessairement simple à déterminer et peut être fonction de rayon. Par exemple, une spirale peut être à deux bras dans les régions intérieures et à plusieurs bras dans la région. régions extérieures. Les spirales de faible m sont généralement un grand dessin, un terme faisant référence à un modèle global (c'est-à-dire à l'échelle de la galaxie) d'armes puissantes. La spirale typique du grand design a deux bras principaux, comme dans NGC 5364 (cadre inférieur gauche de la figure 19). En revanche, un floclant la spirale a des bras continus par morceaux mais aucun modèle global cohérent (Elmegreen 1981). NGC 5055 est un exemple présenté dans le cadre central gauche de la figure 19. Cette catégorie est concerne principalement les bandes d'ondes optiques. Dans l'infrarouge, une spirale optiquement floclente comme NGC 5055 révèle une spirale de conception globale plus cohérente (Thornley 1996 ; voir aussi Figure 44), indiquant que la poussière est en partie responsable de l'aspect floclé.

Les termes armes « massives » et « filamenteuses » sont dus à Reynolds (1927) et sont discuté par Sandage (1961, 1975). Les bras massifs sont larges, diffus et relativement bas contraste, comme dans M33, tandis que les bras filamenteux sont relativement minces en comparaison et bordés de nœuds ou filaments, comme dans NGC 5457 (M101). De Vaucouleurs (1956) a utilisé à l'origine ces distinctions dans le cadre de sa classification, mais a ensuite abandonné les références au bras en spirale personnage probablement en raison de la complexité qu'il ajoutait à ses types.

Elmegreen & Elmegreen (1987) ont utilisé une approche différente du caractère du bras en spirale en reconnaître une série de classes de bras en spirale basées sur la continuité et la longueur des bras (mais pas forcément contrasté). Dix classes allant du floclant (AC 1 à 4) au grand design (5 à 12 ;

les numéros 10 et 11 ont ensuite été abandonnés). Des exemples de chacun sont illustrés à la figure 20. (voir Elmegreen & Elmegreen 1987 pour une description de chaque classe). Ainsi, le caractère en spirale est une dimension supplémentaire bien développée à la classification des galaxies. Une approche plus simple préconisée par Elmegreen & Elmegreen est « G » pour grand-design, « F » pour flocculant et « M » pour plusieurs bras. On pense généralement que les bras des spirales de grand design sont des ondes de densité et peuvent en fait représenter des modes d'ondes quasi-stationnaires (par exemple, Bertin et al. 1989 ; Zhang 1996, 1998, 1999), bien qu'il existe également des preuves que les spirales peuvent être transitoires. (voir revue de Sellwood 2010). Les spirales flocculantes peuvent être cisailées en étoile auto-propagée régions de formation (Seiden & Gerola 1982).

La figure 19 montre également deux exemples d'une nouvelle classe de spirales, appelées spirales à contre-enroulement. Dans ces cas, un motif en spirale interne s'enroule vers l'extérieur dans le sens opposé à celui d'un motif en spirale externe. Dans le cas de NGC 4622 (rangée 2, milieu), le motif intérieur n'a qu'un seul bras et le motif extérieur a deux bras, tandis que dans NGC 3124 (rangée 2, milieu à droite), le motif intérieur est à deux bras tandis que le motif extérieur est à au moins quatre bras. Les deux cas sont très différents car NGC 4622 est essentiellement non barré alors que dans NGC 3124, l'intérieur la spirale est classée comme une barre. La présence de motifs en spirale à enroulements opposés dans la même galaxie signifie qu'un ensemble de bras est traîné (s'ouvrant dans le sens opposé de la rotation) tandis que l'autre ensemble est en tête (ouvrant dans le sens de rotation). En général, les études de la répartition des poussières ainsi que la rotation des spirales ont montré que les bras tirés sont la règle (de Vaucouleurs 1958). Étonnamment, une analyse simple d'un champ de vitesse et de la configuration de la poussière dans NGC 4622 a conduit Buta, Byrd et Freeman (2003) à conclure que la forte Le modèle extérieur à deux bras de cette galaxie est en tête, tandis que le bras intérieur unique est en retard. Cela a conduit à caractériser NGC 4622 comme une « galaxie spirale inverse », apparemment tournant dans le mauvais sens. Une spirale supplémentaire à contre-enroulement non barrée a été identifiée dans ESO 297–27 par Grouchy et al. (2008). Dans ce cas, le même type d'analyse a montré qu'un seul bras intérieur mène tandis qu'un modèle extérieur à 3 bras traîne. Aucune analyse comparable

n'a pas encore été réalisé pour NGC 3124.

Vaisanen et coll. (2008) ont montré qu'une spirale à deux bras (mais non à contre-enroulement) dans la galaxie à forte interaction, IRAS 18293-3413 est en tête. Même avec ça, le nombre des spirales principales connues est très petite (dVA). On ne s'attend pas à ce que les spirales principales soient aussi de longue durée sous forme de spirales traînantes puisqu'elles ne transfèrent pas de moment cinétique vers l'extérieur et cela est nécessaire au maintien à long terme d'une onde spirale (Lynden-Bell & Kalnajs 1972).

Un exemple intéressant de « brassards » de premier plan a été décrit par Knapen et al. (1995a), qui a utilisé l'imagerie en bande K du centre de la grande spirale de conception M100 pour révéler des détails de sa barre nucléaire et de son anneau/spirale nucléaire bien connu. La barre nucléaire a une tournure majeure qui le relie à deux « nœuds » brillants de formation d'étoiles en bande K. Cette morphologie était interprété en termes d'attentes d'orbites de gaz à proximité d'un Résonance de Lindblad (ILR; Knapen et al. 1995b).

La dernière galaxie de la figure 19 est NGC 4921, un exemple de spirale anémique. C'est un type de spirale déficiente en hydrogène atomique neutre et, par conséquent, elle a un moindre quantité de poussière et d'activité de formation d'étoiles. Les armes de NGC 4921 ressemblent à celles de une galaxie Sb ou Sbc en termes d'angle de tangage et d'étendue, mais sont aussi lisses que celles généralement observé dans les galaxies Sa. Les spirales anémiques ont été reconnues pour la première fois comme des galaxies aux bras « flous » (voir van den Bergh 1998) où la formation d'étoiles a été supprimée en raison de la pression dynamique décapage dans l'environnement de cluster. Dans le cas de NGC 4921, l'environnement est le Amas de coma. L'idée est que de telles galaxies finiront par se transformer en galaxies S0 (van den Bergh 2009a). Les galaxies spirales anémiques sont discutées plus en détail dans la section 10.2.

Seigar et coll. (2008) ont démontré l'existence d'une corrélation entre spirale angles d'inclinaison des bras et masses de trous noirs centraux supermassifs. Le sens de la corrélation est telle que la masse du trou noir est la plus élevée pour les spirales les plus étroitement enroulées et la plus faible pour les spirales les plus serrées. spirales les plus ouvertes. La corrélation est attendue car la masse du trou noir est étroitement corrélée

à la masse bombée et à la concentration de la masse centrale, et l'angle d'inclinaison du bras en spirale est lié au cisaillement des disques galactiques, qui dépend elle-même de la concentration massique (Seigar et al. 2005).

6.5. Effets de luminosité

Les effets de luminosité sont évidents dans la morphologie des galaxies à travers la luminosité de la surface, les différences entre les géants et les nains, et à travers la sophistication des structures telles que les bras en spirale. van den Bergh (1998) décrit son système de classification qui prend la luminosité en compte en utilisant un ensemble de classes de luminosité analogues à celles utilisées pour

les étoiles. Les spirales les plus grandes et les plus massives ont des bras longs et bien développés, tandis que les spirales les plus petites et les moins massives ont des bras courts et peu développés.

Les spirales massives ont des bras moins bien définis.

La nomenclature des classes est parallèle à celle des étoiles : I (galaxies supergéantes), II (galaxies géantes brillantes), III (galaxies géantes), IV (galaxies sous-géantes) et V (galaxies naines). Les cas intermédiaires I-II, II-III, III-IV et IV-V sont également reconnus.

La figure 21 montre les galaxies que van den Bergh (1998) considère comme ayant une luminosité primaire. Les normes de son système de classification. Les normes originales de Van den Bergh pour ces normes étaient basées sur les impressions papier à petite échelle du Palomar Sky Survey. Sandage et Tammann (1981) ont adopté les préceptes des classes de van den Bergh mais ont révisé les normes basées sur des plaques à grande échelle. En général, les galaxies de classe de luminosité I ont les bras les plus longs et les mieux développés, les galaxies de classe de luminosité III ont des bras courts et inégaux s'étendant du corps principal, tandis que les galaxies de classe de luminosité V ont une surface très faible luminosité et seulement un soupçon de structure en spirale. Les classes sont séparées par type dans la figure 21 car parmi les galaxies Sb, peu sont de classe de luminosité III ou plus faible, tandis que parmi les galaxies Sc et dans les galaxies de type ultérieur, on trouve toute la gamme des classes de luminosité. van den Bergh ne le fait pas utiliser des types comme Sd ou Sm pour les types tardifs conventionnels de Vaucouleurs, mais utilise à la place S- et

S + pour désigner les spirales sous-géantes « précoces » (plus lisses) et « tardives » (plus inégales). De même, fourgon den Bergh utilise Sb- et Sb+ pour désigner respectivement les spirales Sb « précoces » et « tardives ». (Quelques dont certains seraient classés Sab et Sbc par de Vaucouleurs.) Selon les normes répertorié par van den Bergh (1998), une galaxie Sb I est 2 à 3 mag plus lumineuse qu'une galaxie Sb III galaxie, tandis qu'une galaxie Sc I est plus de 4 mag plus lumineuse qu'une galaxie SV.

7. La morphologie des barres et ovales galactiques

Les barres font partie des caractéristiques morphologiques les plus courantes des galaxies en forme de disque. Contrairement aux bras spiraux, les barres traversent la « division spirale-S0 » dans la séquence de Hubble et sont abondant parmi les spirales (au niveau de 50 à 70 %) lorsque les types SAB et SB sont pris en compte (de Vaucouleurs 1963 ; Sellwood et Wilkinson 1993). La fraction bar a cosmologique importance (Sheth et al. 2008), et de nombreuses estimations de la fraction des barres de galaxies proches ont été réalisées à partir d'études optiques et IR (voir Buta et al. 2010a pour un résumé des récentes travail).

Les barres sont des caractéristiques assez bien comprises de la morphologie des galaxies qui ont été liées à une instabilité naturelle dans un disque stellaire supporté en rotation (voir revue de Sellwood & Wilkinson, 1993). On pense que le maintien à long terme d'une barre dans une galaxie essentiellement isolée cela dépend de l'efficacité avec laquelle il transfère le moment cinétique aux autres composants de la galaxie, comme le halo (Athanassoula 2003). On pense que les barres sont des éléments transitoires qui, en galaxies spirales, peuvent se dissoudre et se régénérer plusieurs fois au cours du temps de Hubble (Bournaud & Combes 2002). Alternativement, les barres peuvent être des modes d'ondes de densité à longue durée de vie qui conduisent à des phénomènes séculaires. évolution des distributions stellaire et gazeuse (Zhang & Buta 2007; Buta & Zhang 2009). La possible évolution séculaire des barres dans les galaxies S0 est discutée par Buta et al. (2010b). On pense également que les barres génèrent des ondes de densité en spirale (Kormendy & Norman 1979 ; Buta et coll. 2009 ; Salo et coll. 2010).

La morphologie réelle des barres présente des variations intéressantes qui méritent une étude plus approfondie.

Les classifications familiales SAB et SB indiquent une certaine mesure de la résistance des barres, mais ne le font pas.

font allusion aux apparences variées des bars, même parmi ceux uniquement classés SB. Régulier

les barres, telles que celles illustrées à la figure 8, sont les types conventionnels qui définissent le SB

classe. La figure 22 montre des barres de type « ansae », faisant référence à des barres dotées de « poignées » ou de barres brillantes.

améliorations aux extrémités. Martinez-Valpuesta et al. (2007) ont réalisé une étude statistique

et a découvert que les ansées sont présentes dans environ 40 % des galaxies barrées de type précoce et sont très rares.

pour les types postérieurs au stade Sb. Les anses sont généralement détectables sur des images directes, mais leur

la visibilité peut être améliorée en utilisant le masquage flou (toutes les bonnes images pour chaque galaxie dans

Figure 22). Morphologiquement, les anses peuvent être de petites améliorations rondes comme celles observées dans

NGC 5375 et 7020, mais dans certains cas, les ansae sont des améliorations approximativement linéaires,

donnant à la barre un aspect de parallélogramme comme dans NGC 7098, ou d'arcs courbes, donnant à la barre

une apparence d'anneau partiel comme dans NGC 1079. Les cartes d'index de couleur dans le dVA montrent que les ansae

sont généralement aussi rouges que le reste de la barre, ce qui indique que les caractéristiques sont extrêmement dynamiques dans

origine, plutôt que gaz-dynamique. Néanmoins, les anses constituées de régions de formation d'étoiles sont

connu. Martinez-Valpuesta et al. (2007) illustrent le cas de NGC 4151, une planète bien connue

Galaxie Seyfert 1 avec un ovale intérieur en forme de barre. L'apparition des anses de cette galaxie dans

la bande H de 1,65 μm est représentée dans les cadres inférieurs droits de la figure 22, où les anses sont

on voit qu'ils ont des formes irrégulières par rapport aux autres illustrés.

Une autre subtilité des barres est leur caractère carré général. Athanassoula et coll. (1990)

ont montré que les ellipses généralisées correspondent mieux aux isophotes projetés des barres que les ellipses normales.

des ellipses. Pour 11 ou 12 galaxies SB0 examinées dans cette étude, un degré significatif de boxiness

a été trouvé près du rayon du demi-grand axe de la barre.

L'image floue masquée de NGC 7020 sur la figure 22 montre un motif en forme de X dans

les régions intérieures qui sont la signature probable d'une barre significativement tridimensionnelle. MBAC

1079 et 5375 montrent des indices de structure similaire. Le motif X devrait être particulièrement évident dans les galaxies de bord qui montrent la structure verticale étendue des barres. Beaucoup des exemples ont été analysés (Bureau et al. 2006 ; voir aussi le d'VA). Buta et coll. (2010a) ont suggéré que les barres de bord reconnues à partir du motif X soient notées « SBx ».

La cause de bar ansae est incertaine. Dans les simulations, Martinez-Valpuesta et al. (2006) ont découvert que les anses se forment tardivement, après un deuxième épisode de flambage de barres dans un modèle de disque avec un halo axisymétrique et apparaissent comme des améliorations de densité à la fois sur la face et sur la tranche vues.

La figure 23 montre trois exemples de galaxies possédant des disques internes ovales. Ces fonctionnalités sont décrits en détail par Kormendy et Kennicutt (2004=KK04), qui présentent à la fois critères photométriques et cinématiques pour les reconnaître. Les images de la figure 23 sont optique et ont été nettoyés des objets de premier plan et d'arrière-plan, et ont également été déprojeté en fonction de la forme moyenne et de l'angle de position du grand axe des isophotes externes faibles. Dans les trois cas, la présence d'un anneau extérieur permet de reconnaître clairement la forme ovale, en supposant que les structures intérieures et extérieures sont dans le même plan. Les panneaux supérieurs de La figure 23 montre la morphologie complète avec les anneaux extérieurs, tandis que les panneaux inférieurs montrent la disques intérieurs ovales brillants. Les formes des disques ovales sont variées et vont du rapport d'axe 0,84 pour NGC 4736 à 0,55 pour NGC 1808. L'exemple le plus frappant est NGC 4941, dont le disque ovale comprend un motif en spirale brillant d'apparence normale avec un rapport d'axe isophotal de 0,68. De nombreux autres exemples sont fournis par KK04.

Les ovales semblent jouer un rôle semblable à celui d'une barre dans ces galaxies. Les anneaux extérieurs peuvent être réponses résonantes au potentiel non axisymétrique des ovales, qui abritent clairement un beaucoup de masse malgré la douceur de leurs écarts par rapport à l'axisymétrie. Comme indiqué d'ici KK04, les galaxies à disques ovales devraient évoluer séculairement de la même manière comme les galaxies barrées typiques. D'un autre côté, les ovales eux-mêmes pourraient être des produits de barres

évolution séculaire. Laurikainen et coll. (2009) ont constaté que la fraction de barre proche IR dans S0 galaxies est significativement inférieure à celle des galaxies spirales S0/a ou de type précoce (également trouvées par Aguerri et al. 2009 en optique), alors que la fraction ovale/lentille est plus élevée, suggérant que certains ovales/lentilles peuvent être des barres dissoutes. Preuve supplémentaire que les barres pourraient être en train de se dissoudre dans certaines galaxies, la détection de barres extrêmement faibles dans les images résiduelles de l'image visuelle galaxies S0 non barrées où un modèle de décomposition bidimensionnel a été soustrait.

Une telle barre est détectée dans la galaxie SA0o NGC 3998 (Laurikainen et al. 2009). Aguerri et Al. (2009) suggèrent que la concentration centrale est un facteur clé dans l'évolution du bar, et qu'un la répartition unimodale des forces des barreaux va à l'encontre de l'idée selon laquelle les barreaux se dissolvent et se reforment (Bournaud & Combes 2002).

Les galaxies barrées régulières comprennent également souvent un ovale délimité par un anneau intérieur allongé. Les images de lumière bleue déprojetées de deux exemples sont présentées à la figure 24. NGC 1433 a une barre normale très solide et l'un des anneaux intérieurs les plus intrinsèquement allongés connus. L'anneau intérieur se trouve au bord d'un ovale qui est plus visible aux longueurs d'onde plus longues. Dans NGC 1433, l'anneau intérieur, l'ovale et la barre sont tous alignés parallèlement les uns aux autres. La situation est différente dans ESO 565–11, dont l'ovale brillant est fortement désaligné avec un barre proéminente, mais similaire à NGC 1433, l'ovale est délimité par un pseudo-anneau interne. La suggestion dans ce cas est que la barre et l'ovale sont des motifs indépendants.

8. Morphologies de la poussière

Les bandes de poussière constituent souvent la partie la plus importante du milieu interstellaire détectable dans une image optique d'une galaxie. La figure 25 montre différentes classes de couloirs de poussière, utilisant des des images optiques à gauche pour chaque galaxie et une carte d'index de couleurs à droite. La couleur des cartes d'index sont codées de telle sorte que les entités bleues soient sombres tandis que les entités rouges (comme les bandes de poussière) sont légers.

Les barres des spirales intermédiaires (principalement Sab à Sbc) présentent souvent des bandes de poussière principales, c'est-à-dire des voies bien définies situées sur les bords d'attaque des barres, en supposant que les bras en spirale piste. L'exemple montré sur la figure 25, NGC 1530, possède une barre exceptionnellement résistante et le les voies sont très droites, régulières et bien définies. Ces voies de poussière sont un effet dynamique associé au bar. Les voies peuvent être courbes ou droites. Athanassoula (1992) a dérivé modèles de couloirs de poussière de bar et lié la courbure à la résistance de la barre dans le sens où les modèles dotés de barres plus solides développaient des voies de poussière plus droites. Comerón et al. (2009) récemment testé cette idée en mesurant la courbure des voies de poussière réelles ainsi que des mesures quantitatives valeurs des forces des barres pour 55 galaxies. Ils ont découvert que les barres solides ne peuvent avoir des voies de poussière droites, tandis que les barres plus faibles peuvent avoir des voies droites ou courbes.

De la même manière que les barres, une spirale solide présente souvent des bandes de poussière sur les côtés concaves. l'intérieur des bras. Ceci est illustré pour NGC 1566 dans les panneaux supérieurs droits de la figure 25. Les deux les voies de poussière en barres et en spirale sont des modèles face à face. Un autre type de motif face à face est la poussière anneau. L'anneau de poussière interne de NGC 7217 est illustré dans les cadres centraux de droite de la figure 25, et il apparaît comme le bord intérieur sombre d'un anneau stellaire ayant la même forme. Anneaux anti-poussière peut également être détecté dans des galaxies plus inclinées.

Une galaxie inclinée avec un renflement important peut également montrer un autre effet de poussière : dans un tel Dans un cas, le renflement est vu à travers la couche de poussière située sur la face proche du disque, tandis que le la poussière est visible à travers le renflement situé de l'autre côté du disque. Cela entraîne une rougeur et une asymétrie d'extinction à travers l'axe mineur de telle sorte que le côté proche de l'axe mineur est plus rougie et éteinte que la face cachée. En conjonction avec les données de rotation, cette asymétrie côté proche/côté éloigné a été utilisée par Hubble (1943) et de Vaucouleurs (1958) pour montrent que la plupart des spirales suivent le sens de rotation.

Les cadres inférieurs de la figure 25 montrent les bandes de poussière planes vues en spirale sur la tranche. galaxies. La voie dans NGC 7814 (cadres inférieurs gauches) est rouge, ce qui indique que la galaxie

n'est probablement pas plus récent que Sa. Ceci est cohérent avec le grand renflement observé dans le galaxie. Cependant, la bande de poussière planaire observée dans NGC 891, de type Sb, présente une fine section bleue en au milieu d'une section rouge plus large. La couleur bleue est probablement due à la formation d'étoiles externes qui connaît une extinction relativement faible. Certaines régions individuelles de formation d'étoiles peuvent être observées le long de le chemin de la poussière. Malgré la couleur bleue, on ne voit que le bord extérieur du disque dans le avion.

Les observations de paires de galaxies occultantes sont également liées à la distribution de poussière galactique, où une galaxie spirale au premier plan occulte en partie une galaxie à l'arrière-plan, idéalement une galaxie elliptique. (White et Keel 1992). Avec de telles paires, on peut estimer la profondeur optique du premier plan poussière, souvent dans des zones où elle pourrait être difficile à voir dans une spirale isolée. Un excellent Un exemple est décrit par Holwerda et al. (2009), qui sont capables de retracer la répartition de la poussière dans une galaxie occultante à 1,5 fois le rayon isophotique standard.

Une autre façon d'illustrer la répartition de la poussière dans les galaxies est d'utiliser Spitzer Space. Images de la caméra infrarouge du télescope (IRAC) à une longueur d'onde de 8,0 μm . Ceci est discuté plus loin dans la section 12.

9. Les morphologies des renflements galactiques

Un renflement est un élément très important d'une galaxie à disque. Dans le contexte de la structure formation dans une cosmologie de matière noire froide (MDP), des renflements peuvent se former par voie hiérarchique. fusion de galaxies à disques, un processus censé conduire à des galaxies elliptiques si les disques ont masse à peu près égale. Les renflements ainsi formés devraient alors ressembler à des renflements elliptiques. galaxies, en particulier pour les spirales de type précoce. Les renflements des spirales de type ultérieur peuvent cependant être très différent des attentes d'un renflement construit par une fusion (également connu sous le nom de « classique » renflement). Dans de nombreux cas, le renflement semble être constitué d'un matériau associé au disque.

KK04 a passé en revue le concept de « pseudobulges », faisant référence aux renflements de galaxies qui peuvent se sont formés par un lent mouvement séculaire du gaz du disque vers les régions centrales (également connu sous le nom de renflements en forme de disque ; Athanassoula 2005). Le principal agent moteur du mouvement du gaz est on pense qu'il s'agit de barres, répandues parmi les galaxies spirales et qui exercent une gravité couples qui peuvent déplacer le matériau en redistribuant le moment cinétique. À l'intérieur de résonance de corotation, où la vitesse du motif de barre est égale à la vitesse de rotation du disque, le gaz peut être enfoncé au centre pour fournir la matière première nécessaire à la construction d'un pseudo-renflement. KK04 examiner les preuves de tels processus et affirmer que les pseudobulges sont une forte indication que l'évolution séculaire est un processus important dans les galaxies en forme de disque.

La figure 26 montre les morphologies des renflements classiques et des pseudobulges. Les quatre les galaxies renflées classiques illustrées dans la rangée inférieure, M31, NGC 2841, M81 et M104, ont centres lisses et brillants et aucune preuve de structure en spirale ou de formation d'étoiles. Classique les renflements ont également tendance à avoir des formes plus rondes que les disques et peuvent avoir un renflement total important. rapports de luminosité illustrés par M104. Les renflements classiques sont également davantage soutenus par mouvements aléatoires que par rotation. De nombreuses références à des études classiques de renflement sont données par KK04. Les mécanismes de formation de tels renflements sont discutés en détail par Athanassoula (2005).

Les deux rangées supérieures de la figure 26 sont toutes des pseudobulges reconnus par KK04. La première la rangée montre des images HST à large bande V (filtre F606W) de l'intérieur 1-1,3 kpc de quatre galaxies, NGC 3177, 4030, 5377 et 1353, dans la gamme de types Sa-Sbc. Les zones indiquées représentent une grande partie de l'augmentation de la luminosité de la surface au-dessus de l'extrapolation vers l'intérieur de la lumière du disque externe dans ces galaxies, et seraient considérés comme des renflements uniquement sur cette base. Les images TVH montrent : cependant, une structure spirale considérable, de la poussière, de petits anneaux et probablement une formation d'étoiles dans ces régions, caractéristiques non attendues pour un renflement classique. KK04 affirme qu'à la place, ces sont des pseudobulges très aplatis, ayant une forme projetée similaire à celle du disque externe

lumière, ont des profils de luminosité approximativement exponentiels (indice Sersic $n \approx 1-2$) et ont un rapport élevé entre rotation ordonnée et mouvements aléatoires. KK04 affirme qu'un faible indice Sersic par rapport à $n=4$ semble être la marque de ces pseudobulges, et une signature de évolution séculaire.

La deuxième rangée de la figure 26 montre d'autres types de pseudobulges évoqués par KK04. NGC 6782 et 3081 (deux images de gauche) ont des barres secondaires, et KK04 a considéré que de telles les fonctionnalités indiquent la présence d'un pseudobulge car les barres sont toujours des fonctionnalités de disque. Dans dans chaque cas, la barre secondaire se trouve à l'intérieur d'un anneau nucléaire.

Les deux autres galaxies de la deuxième rangée de la figure 26, NGC 128 et 1381, en sont des exemples. de renflements carrés ou en forme de cacahuète. Ces caractéristiques ont été liées au chauffage vertical de barres, et si c'est ce qu'elles sont réellement, alors KK04 affirme que boxy et box-peanut les renflements sont également des exemples de pseudobulges. Cependant, les renflements de type boxy et box/cacahuète seraient pas nécessairement le résultat d'un mouvement lent du gaz par les couples de barre, et de l'étoile ultérieure formation dans les régions centrales, mais serait plutôt lié à la structure orbitale du bar lui-même (Athanassoula 2005).

Des études récentes ont montré que les pseudobulges constituent le type dominant de lésions centrales. composant dans les galaxies à disques. Bien qu'à l'origine on pensait qu'il était important uniquement pour les espèces tardives galaxies, Laurikainen et al. (2007) ont montré que les pseudobulges se retrouvent partout dans le Séquence de Hubble, y compris parmi les galaxies S0-S0/a, basée sur des données bidimensionnelles sophistiquées décompositions photométriques. De telles galaxies possèdent fréquemment des barres nucléaires, des disques nucléaires ou des anneaux nucléaires. Laurikainen et coll. a également constaté que les rapports de flux renflé/total (B/T) sont très élevés. moins que ce qu'indiquaient des études antérieures, en particulier pour les premiers types de Hubble, et que le Sersic l'indice est en moyenne de 2 pour tous les types. Le manque de gaz dans les galaxies S0 et S0/a complique l'interprétation de leurs pseudobulges en termes de flux de gaz entraîné par une barre et d'étoiles ultérieures formation. Au lieu de cela, Laurikainen et al. relier les pseudobulges des galaxies de type précoce aux

évolution des barres. Laurikainen et coll. (2010) ont également montré que les S0 peuvent présenter des pseudobulges si ce sont des spirales dénudées, sans invoquer aucune évolution induite par la barre.

10. Effets des interactions et des fusions

La morphologie des galaxies regorge de preuves d'interactions gravitationnelles, allant des rencontres mineures et lointaines aux collisions violentes et aux fusions majeures/mineures. Un grand nombre de les morphologies les plus déroutantes et les plus exotiques peuvent s'expliquer par des interactions, et même des galaxies sublimement normales, comme les elliptiques ordinaires, ont été reliées à des galaxies catastrophiques. rencontres. Jusqu'à 4 % des galaxies brillantes proches sont impliquées dans une interaction majeure (Knapen & James 2009). Dans les clusters, d'autres types d'interactions peuvent se produire, telles que le dégazage et troncature du disque formant étoile. Dans cette section, une variété de types de morphologies qui peuvent être considérés comme les résultats des interactions externes sont décrits et illustrés.

10.1. Anneaux normaux ou catastrophiques

Les trois types d'anneaux décrits jusqu'à présent, les anneaux nucléaire, interne et externe, sont des aspects de la morphologie de galaxies relativement normales et non perturbées. Anneaux intérieurs et pseudo-anneaux se trouvent dans plus de 50 % des galaxies à disques normaux (Buta & Combes 1996), tandis que les galaxies externes les anneaux et pseudo-anneaux se trouvent au niveau de 10%. Ces dernières sonneries pourraient être plus fréquentes car leur malaise peut les faire passer inaperçus, ce qui est moins susceptible de se produire pour anneaux intérieurs. Comme cela a été noté, les anneaux nucléaires se trouvent à hauteur de 20 % (Comerón et al. 2010). La grande abondance de ces types de caractéristiques annulaires suggère qu'elles sont principalement produits de la dynamique interne, et en fait, les trois types d'anneaux ont été interprétés dans termes de processus internes dans les galaxies barrées. La principale interprétation de ce type de anneaux a été en termes de résonances orbitales avec la vitesse du motif d'une barre, d'un ovale ou d'un

onde de densité en spirale. Les résonances sont des endroits spéciaux où un bar peut collecter du gaz de manière séculaire en raison des propriétés des orbites périodiques (Buta & Combes 1996). Buta (1995) a montré que les formes intrinsèques et les orientations relatives des barres des anneaux et pseudo-anneaux intérieurs et extérieurs prend en charge l'interprétation par résonance des caractéristiques. Schwarz (1981) a suggéré l'approche externe Résonance de Lindblad pour les anneaux extérieurs et les pseudo-anneaux, tandis que Schwarz (1984) a suggéré la résonance ultraharmonique intérieure 4:1 pour les anneaux intérieurs et les pseudo-anneaux, ainsi que le Lindblad intérieur résonance pour les anneaux nucléaires. Knapen et coll. (1995b) et Buta & Combes (1996) fournissent un aperçu plus approfondi de ces interprétations.

L'idée de résonance ne peut être valable que dans le cas de faibles perturbations. Dans le en présence d'une forte perturbation, la notion de rayon de résonance spécifique peut s'effondrer, même si l'idée d'une large région de résonance pourrait encore être valable (Contopoulos 1996). Régane et Teuben (2003, 2004) soutiennent que les anneaux nucléaires et les anneaux internes sont mieux interprétés dans termes de transitions d'orbite, c'est-à-dire des régions où les orbites périodiques passent d'un famille d'orbites à une autre, comme dans la transition de la famille x2 alignée perpendiculairement à la famille x1 alignée sur barre (Contopoulos & Grosbol 1989).

Les anneaux normaux ont également été interprétés en termes de « variétés invariantes » qui émanent des points lagrangiens instables L1 et L2 dans le potentiel de la barre (Romero-Gómez et al. 2006, 2007 ; Athanassoula et coll. 2009a,b). Cette approche a également eu quelques succès dans la prédiction des formes et des orientations des bagues intérieures et extérieures, comme la R1, R'_{1-} et R'_{2-} morphologies illustrées à la Figure 14 et à la Figure 15. Une morphologie appelée « rR1 », qui comprend un anneau intérieur ovale et un anneau R1 en forme de huit (voir NGC 1326 sur la figure 15), est particulièrement bien représenté par ce type de modèle. Les collecteurs sont des tubes qui guident les orbites échappant aux régions L1 et L2. Notez que dans cette interprétation, l'extérieur les anneaux ne sont pas nécessairement associés à l'OLR (Romero-Gómez et al. 2006).

Bien que la grande majorité des motifs en forme d'anneaux observés dans les galaxies soient probablement

le type résonance/transition d'orbite/collecteur invariant, d'autres classes d'anneaux sont connues qui sont probablement le résultat de processus plus catastrophiques, tels que les collisions de galaxies. Figure 27 montre les anneaux de résonance par rapport à trois autres types : les anneaux d'accrétion, les anneaux polaires et anneaux de collision (ces derniers communément appelés « galaxies en anneaux »). Les trois accrétions anneaux montrés, dans Hoag's Object (Schweizer et al. 1987), IC 2006 (Schweizer et al. 1989), et NGC 7742 (de Zeeuw et al. 2002) seraient constitués de matériaux provenant d'un galaxie satellite accrétée. Pour IC 2006 et NGC 7742, la preuve en est trouvée dans contre-rotation : le matériau dans les anneaux tourne à contre-courant par rapport au matériau dans le reste des galaxies. Dans Hoag's Object et IC 2006, la galaxie en accrétion est un E normal système.

Les anneaux polaires sont également des éléments accumulés, sauf que la galaxie qui s'accrète est généralement un système en forme de disque, le plus souvent un S0 (Whitmore et al. 1990). Dans ces cas, l'accumulation le matériau entre sous un angle élevé par rapport au plan du disque. La configuration est la plus stable si l'angle d'accrétion est proche de 90° , ou sur les pôles du système de disques. Cela limite le capacité de la précession différentielle à amener le matériau de l'anneau à se déposer rapidement dans le corps principal disque. L'élément polaire peut être un anneau ou simplement un disque incliné et étendu. Whitmore et coll. (1990) ont présenté un vaste catalogue de galaxies à anneaux polaires probables et possibles.

Le principal exemple illustré sur la figure 27 est NGC 4650A, où le disque interne Le composant est un S0. Les galaxies comme NGC 4650A ont donné lieu à des recherches considérables car les anneaux polaires sondent la forme du potentiel du halo sombre (par exemple, Sackett et al. 1994). Le les galaxies sont également spéciales parce que les objets qui fusionnent ont conservé leurs identités distinctes, alors que la plupart des fusions aboutissent à un seul objet. Brook et coll. (2008) relient les disques mal alignés de galaxies à anneaux polaires au processus de formation de structures hiérarchiques dans une matière noire froide scénario.

Alors que les anneaux polaires sont plus facilement reconnaissables lorsque les deux disques sont presque face à nous,

des cas où l'un ou l'autre disque est presque face à face ont également été reconnus. Un exemple, ESO 235–58 (Buta & Crocker 1993) est illustré dans le panneau du milieu à droite de la figure 27. Dans ce cas, le composant interne est presque exactement sur la tranche et présente une bande de poussière plane, et il s'agit probablement d'une spirale plutôt que d'un S0. Le composant annulaire est fortement incliné vers le plan de ce disque interne mais peut ne pas être polaire. Les bras extérieurs faibles de ce composant a provoqué la classification erronée de l'ESO 235–58 comme spirale barrée de type tardif dans RC3. Structure en spirale Il a été démontré que les disques polaires sont excitables par le potentiel du disque interne, qui agit quelque chose comme un bar (Theis, Sparke et Gallagher 2006).

Un exemple où le disque principal est vu presque de face est NGC 2655 (Sparke et Al. 2008). Dans ce cas, le matériau de l'anneau polaire est vu comme des bandes de poussière se découpant à une certaine distance. angle inhabituel par rapport aux isophotes internes. NGC 2655 montre également des signes de faible coquilles/ondulations, révélatrices d'une fusion récente (section 10.3.3). Sil'chenko et Afanasiev (2004) ont discuté de NGC 2655 et d'autres exemples similaires d'anneaux polaires internes en termes de triaxialité du potentiel.

La figure 27 montre également NGC 660, qui a été répertorié comme un anneau polaire possible. galaxie par Whitmore et al. (1990). Comme ESO 235–58, NGC 660 possède une bande de poussière alignée dans son composant de disque interne, qui est donc probablement une spirale et non un S0. L'extraplanaire Le disque est en réalité loin d'être polaire, puisqu'il n'est incliné que de 55° (van Driel et al. 1995). Une récente l'étude des étoiles massives dans l'anneau est donnée par Karataeva et al. (2004).

On pense que les galaxies annulaires de collision (Arp 1966 ; Appleton & Struck-Marcell 1996) Il peut y avoir des cas où une galaxie plus grande subit une collision frontale avec une galaxie plus petite sur son axe polaire. La collision provoque une onde de densité croissante de formation d'étoiles massives, et plusieurs sonneries sont possibles. Trois exemples sont présentés dans la figure 27. Theys & Spiegel (1976) ont discuté de diverses classes de galaxies annulaires. Arp 147 (Arp 1966) est un exemple de type « RE », faisant référence à un anneau elliptique pointu avec un intérieur vide. La roue (Higdon

1995) et l'anneau de Lindsay-Shapley (Arp & Madore 1987) sont des exemples de type « RN », c'est-à-dire un anneau elliptique avec un noyau décentré. Non représenté sur la figure 27 est un troisième catégorie appelée « RK », où un seul et gros nœud se trouve sur un côté de l'anneau, ce qui rend le système très asymétrique.

Madore, Nelson et Petrillo (2009) ont publié un atlas complet de tous les probables galaxies annulaires collisionnelles, dont beaucoup sont tirées du catalogue d'Arp & Madore (1987). D'après cette étude, seulement 1 galaxie sur 1 000 est une galaxie en anneau de collision. Pour l'entrée, le Madore et coll. l'atlas nécessite au moins deux objets à proximité immédiate de l'anneau qui pourrait vraisemblablement être la galaxie intruse. La plupart des anneaux ne se trouvent pas dans des environnements de cluster, cependant. L'atlas attire également l'attention sur plusieurs systèmes de collision à double anneau, qui ont été prédits par des simulations numériques (voir Struck 2010 pour une revue). L'insolite des « rayons » radiaux dans la Roue, une caractéristique que l'on ne retrouve dans aucune autre galaxie annulaire collisionnelle, pourrait être lié aux flux d'accrétion interactifs (Struck et al. 1996).

Romano, Mayya et Vorobyov (2008) présentent des images de plusieurs galaxies en anneau qui montrent le disque stellaire avant la collision. Ils montrent également que les anneaux sont généralement délimités par du bleu. nœuds et que les noyaux décentrés sont généralement de couleur plus jaune. De plus, certains de les galaxies compagnes montrent une lumière extérieure asymétrique diffuse, suggérant qu'elles sont en train d'être dépouillé.

La figure 27 montre que les anneaux d'accrétion peuvent expliquer certains des anneaux observés dans les zones non barrées. galaxies. Buta & Combes (1996) soutiennent qu'une barre est un élément essentiel dans l'anneau de résonance formation. ESO 235–58 montre qu'un système lié à un anneau polaire peut ressembler à un système annelé, galaxie barrée. Les trois anneaux de collision sont tous très distinctifs des autres.

10.2. Effets environnementaux sur les disques de formation d'étoiles

Les amas de galaxies sont d'excellents laboratoires pour détecter les effets de l'environnement sur la morphologie et la structure des galaxies. Fusions fréquentes et conversion environnementale de on pense que les spirales en S0 sont au cœur de la relation morphologie-densité, où les galaxies de type précoce dominent les noyaux d'amas, et les spirales et les galaxies irrégulières se trouvent principalement dans les régions extérieures (Dressler 1980 ; van der Wel et al. 2010).

La question des effets environnementaux a une incidence directe sur la façon dont nous pourrions interpréter la séquence de Hubble. Par exemple, la continuité de la morphologie des galaxies semble certainement ressort des discussions des sections précédentes de cette revue. La séquence Hubble E-S0-Sa-Sb-Sc-I apparaît physiquement significatif lorsque les couleurs totales, les luminosités moyennes des surfaces, et les rapports masse/lumière bleue HI sont pris en compte, ainsi que la façon dont les caractéristiques sont reconnues dans le Les systèmes de classification favorisent également la continuité. La continuité morphologique ne signifie cependant pas impliquent automatiquement que les types de galaxies sont en fait correctement ordonnés. Par exemple, bien que Hubble ait placé les S0 comme type de transition entre les galaxies elliptiques et les spirales, cela Le placement a été remis en question par van den Bergh (1998, 2009a). Basé sur une statistique En analysant les types donnés dans le RSA, van den Bergh a montré que les galaxies S0 sont généralement 0,8-1,0 mag moins lumineuses que les galaxies E et Sa, ce qui implique que les galaxies S0, dans leur ensemble, ne peut pas vraiment être considérée comme intermédiaire entre les galaxies E et Sa.⁵ La prépondérance de galaxies S0 en amas ont conduit à la première suggestion (par exemple, Spitzer & Baade 1951 ; Gunn & Gott 1972 ; Moore et coll. 1996) qu'un certain type d'interaction environnementale externe

⁵ Contrairement à l'étude de van den Bergh sur les galaxies RSA S0, Laurikainen et al. (2010) ont découvert que les amplitudes absolues de la bande Ks d'un échantillon bien défini de S0 sont similaires à ceux des spirales de type précoce dans l'échantillon OSUBSGS. L'échantillon était principalement constitué de RC3 et comprend certaines galaxies classées comme elliptiques dans RC3 et comme S0 dans le RSA (voir article 12).

était responsable de dépouiller une galaxie spirale de son milieu interstellaire. Si c'est effectivement s'est alors produit, comme le suggère van den Bergh (2009a), cela pourrait impliquer que les galaxies S0 ont perdu une fraction substantielle de leur masse spirale en raison des interactions. Alternativement, une camionnette den Bergh (2009b) soutient que le décapage d'une spirale de type tardif de plus faible luminosité devrait être plus facile que le décapage d'une spirale de type précoce à luminosité plus élevée, ce qui pourrait également expliquer la différence de luminosité. Dans un examen de l'environnement des galaxies S0, van den Bergh (2009b) n'a trouvé aucune différence significative dans les luminosités moyennes, les aplatissements ou répartition des sous-types S0 en grappes, en groupes ou sur le terrain, indiquant que certains S0 se développent en raison d'effets internes, tels que l'influence d'un noyau galactique actif.

Barway et coll. (2011) ont noté que les S0 de faible luminosité ont une fraction de barre plus élevée que des S0 de luminosité plus élevée (83 % contre 17 %), ce qui suggère que les deux groupes se forment de manière différente. manières (voir aussi Barway et al. 2007). Ces auteurs suggèrent que les S0 faibles sont supprimés les spirales de type tardif, connues pour avoir une fraction de barre élevée (Barraza et al. 2008).

Les effets environnementaux dans les clusters ne nécessitent pas toujours des transformations drastiques en morphologie. Parfois, les effets sont plus subtils. La figure 28 montre plusieurs spirales galaxies qui sont également membres de l'amas de la Vierge. Ces galaxies mettent en évidence des processus qui affectent le disque de formation d'étoiles tout en laissant l'ancien disque stellaire relativement peu affecté. NGC 4580 et 4689 sont des galaxies ayant un disque interne inégal et un disque externe lisse, appelés « Types de Vierge » par van den Bergh et al. (1990). Ces objets suggèrent que l'environnement de telles galaxies a en quelque sorte tronqué le disque de formation d'étoiles, avec une plus grande concentration de disques tronqués vers le cœur du cluster. Des résultats similaires sont obtenus à partir d'observations des disques de gaz HI des galaxies de l'amas de la Vierge (par exemple, Giovanelli & Haynes 1985 ; Cayatte et al. 1994 ; Chung et coll. 2009).

Koopmann & Kenney (2004) résument les résultats d'une enquête approfondie sur H α émission des galaxies de l'amas de la Vierge et identifier différentes catégories de pollutions environnementales.

influencé les caractéristiques de formation d'étoiles basées sur l'imagerie H α . Les images en lumière bleue de des exemples de chaque catégorie sont inclus dans la figure 28 et montrent comment les subtilités sont se manifeste par une morphologie régulière. Utiliser un échantillon de galaxies spirales isolées pour définir formation d'étoiles « normale », Koopmann et Kenney ont défini plusieurs catégories de spirale de la Vierge disques de formation d'étoiles de galaxies : la catégorie « N » fait référence aux disques dont la formation d'étoiles se situe dans un facteur de trois des niveaux normaux. Les cas « E » ont une formation d'étoiles améliorée de plus de un facteur trois par rapport à la normale. Les cas « A » sont des spirales « anémiques » (section 6.4) ayant formation d'étoiles réduite de plus d'un facteur 3 par rapport à la normale. « T/N » fait référence aux galaxies où le disque de formation d'étoiles est nettement coupé, mais à l'intérieur de la coupure, l'étoile les niveaux de formation sont normaux (le [s] signifie que la troncature est sévère). L'un d'eux, NGC 4580, est si inhabituel que Sandage & Bedke (1994) le classent comme Sc(s)/Sa, où la partie Sc est la disque interne et la partie Sa est le disque externe. Dans les « galaxies T/A », la formation stellaire interne est à un niveau faible, comme dans les cas anémiques, tandis que dans les galaxies « T/C », la majeure partie de la formation d'étoiles est confiné dans le 1 kpc interne. Koopmann et Kenney ont découvert que la majorité des Vierges Les galaxies spirales en amas ont des disques de formation d'étoiles tronqués.

L'idée est que le milieu interstellaire (ISM) d'un amas de galaxies peut interagir avec le milieu intra-cluster (ICM), supprimant l'ISM (via la pression dynamique ; Gunn et Gott 1972) mais en laissant le disque stellaire intact. Il en résulte des gaz tronqués et des disques formant des étoiles parce que la suppression de la pression dynamique est plus sévère dans les parties externes des galaxies (par exemple, Book et Benson 2010 et les références qui y figurent). En Vierge, la plupart des galaxies avec des disques de formation d'étoiles tronqués avoir des disques stellaires relativement intacts et une étoile à disque interne normale à légèrement améliorée taux de formation, ce qui suggère que le décapage ICM-ISM est le principal mécanisme de réduction de leurs taux de formation d'étoiles. Les cas présentant une étoile relativement normale ou améliorée les taux de formation sont préférentiellement situés dans les parties externes du cluster et ont probablement jamais visité la région centrale. Seules les galaxies qui s'approchent du centre reçoivent une dépouillé. Cependant, les effets des marées contribuent également aux changements morphologiques. Plusieurs galaxies,

y compris de nombreux membres de la classe T/C, présentent des particularités compatibles avec les effets de marée, telles que formation d'étoiles circumnucléaires non axisymétriques, caractéristiques de la coquille (par exemple, NGC 4424 sur la figure 28), et des taux de formation d'étoiles internes améliorés.

Une étude récente de Yagi et al. (2010) fournit des preuves spectaculaires et claires de l'existence de gaz de disque décapage dans les galaxies considérées comme des arrivées relativement nouvelles dans la région centrale du Coma Grappe. Grâce à l'imagerie H α profonde, ces auteurs ont détecté du gaz ionisé dans des nuages principalement en dehors du disque principal d'une douzaine de galaxies Coma. Trois morphologies distinctes de les distributions de ces nuages ont été trouvées : (1) nuages connectés qui se fondent avec le disque formation d'étoiles; (2) de longues lignes de nuages connectées qui s'étendent à partir d'un nœud gazeux central mais ne sont pas liés à la lumière du disque ; et (3) des nuages complètement détachés du disque principal. Des exemples de ces catégories sont illustrés à la figure 29. Yagi et al. les interpréter dans termes d'une séquence évolutive de dégazage où les galaxies de catégorie (1) se trouvent dans un état antérieur. phase de décapage alors que les galaxies de catégorie (3) sont dans la phase la plus avancée. C'est Il est probable que les grands disques galactiques de Coma seraient finalement complètement détruits à cause de la haute densité ICM du cluster et sa large distribution de vitesse. Le même processus vu dans Le coma survient probablement en Vierge mais n'est que partiel pour les grandes spirales en raison de l'ICM inférieur. densité et vitesses en Vierge (Koopmann & Kenney 2004).

10.3. Galaxies en interaction et particulières

10.3.1. Queues de marée, bras et ponts

Il est peut-être approprié que la première grande galaxie spirale découverte se trouve dans la zone en interaction. paire M51 (section 2). Des simulations numériques (Salo & Laurikainen 2000a,b) ont montré que les passages paraboliques et liés du compagnon, NGC 5195, peuvent expliquer les phénomènes observés. morphologie et autres caractéristiques du système. Il s'avère que M51 définit une classe

de systèmes en interaction appelés paires de type M51. La figure 30 montre un exemple dans la paire NGC 2535-6. Dans chaque cas, le composant le plus grand présente une solide spirale à deux bras, dont un bras semblant « attiré » vers le plus petit compagnon. Un vaste catalogue de type M51 les paires sont fournies par Jokimaki et al. (2008).

D'autres rencontres lointaines peuvent produire des queues de marée ou des ponts de matière entre galaxies (rangée du haut, figure 30). NGC 4676, également connue sous le nom de « Souris », est une paire de galaxies en interaction où une queue de marée très étendue s'est formée en un seul composant. La paire NGC 5216/18 à forte interaction a développé un pont de connexion brillant de matériau, et chaque composant montre des queues de marée. L'évolution de ce système et le rôle de rencontres sur la formation des barres, est décrit par Cullen et al. (2007).

10.3.2. Vélos elliptiques Dust-Lane

La figure 30 montre également plusieurs exemples de morphologies pouvant résulter de fusions d'une petite galaxie avec une galaxie elliptique préexistante plus massive. Bertola (1987) a attiré l'attention sur la classe inhabituelle des vélos elliptiques à couloir de poussière, où un Cette galaxie elliptique présente des bandes particulières de poussière obscurcissante. C'était l'affaire personnelle de de Vaucouleurs estiment que « si un vélo elliptique montre de la poussière, alors ce n'est pas un vélo elliptique ! » Cependant, Bertola a montré qu'un cas inhabituel comme la galaxie radioelliptique NGC 5128, où une forte bande de poussière se trouve le long du petit axe de la distribution extérieure de la lumière, est simplement l'exemple le plus proche de une classe distincte d'objets. Une étude plus approfondie a montré que les vélos elliptiques Dust-Lane se déclinent en plusieurs variétés. Le type de piste de poussière à petit axe semble le plus courant, mais les cas d'alignement le long du grand axe des isophotes externes (voies de poussière du grand axe) ainsi que des cas de des désalignements sont également connus (voir les panneaux supérieurs gauches de la figure 30). L'origine de ces des couloirs de poussière très réguliers seraient la fusion d'un compagnon riche en gaz (par exemple, Oosterloo et Al. 2002). La régularité des couloirs de poussière laisse penser que les fusions se situent dans des États avancés.

10.3.3. Galaxies de coquilles/ondulations

Les deux cadres inférieurs gauches de la figure 30 montrent des exemples de galaxies possédant des « coquilles », ou de faibles améliorations de luminosité en forme d'arc de morphologie variable. Ils furent les premiers découverts sur des photographies profondes par Malin (Malin & Carter 1980), et semblaient être associés principalement aux galaxies elliptiques. En fait, les premiers exemples, NGC 1344 et 3923, sont classés dans les catalogues comme des elliptiques ordinaires car les coques ne sont pas détectables sur des photographies de profondeur moyenne. Une fois la classe reconnue, une recherche détaillée a conduit à d'autres exemples répertoriés par Malin et Carter (1980, 1983). Le terme « coquilles » implique une géométrie tridimensionnelle particulière qui, selon Schweizer & Seitzer (1988), impose une préjugés sur l'interprétation des structures. Ils ont proposé à la place le terme alternatif « ondulations », ce qui implique une géométrie moins restrictive.

L'explication des galaxies à coquille/ondulation est l'une des grandes réussites de l'histoire galactique. dynamique (voir revue par Athanassoula & Bosma 1985). On pense que les coquilles sont des restes d'une fusion mineure entre une galaxie elliptique massive et une galaxie en forme de disque de masse inférieure. Le principal des exigences sont que la galaxie en forme de disque soit « froide » ou dépourvue de tout mouvement aléatoire, et que le potentiel de la galaxie elliptique devrait être rigide, ce qui signifie que l'elliptique est très plus massif que son compagnon. Les étoiles de la plus petite galaxie tombent au centre de l'espace. la galaxie et la phase s'enroulent, ou forment des ondes de densité alternées se déplaçant vers l'extérieur constituées du disque les particules de la galaxie se rapprochent des excursions maximales de leurs orbites largement radiales dans le potentiel. De nombreuses propriétés principales de la coque Es, mais pas toutes, peuvent être expliquées par ceci. modèle. D'autres questions concernant les galaxies coquilles sont examinées par Kormendy et Djorgovski (1989).

Taylor-Mager et al. (2007 ; voir leur figure 2) ont proposé une classification simple des systèmes interactifs qui mettent en évidence différentes classes d'interaction. Un pré-fusion (type pM) comprend deux galaxies en interaction qui sont suffisamment éloignées l'une de l'autre pour souffrir peu de

Distorsion. Une fusion mineure (mM) correspond à deux galaxies montrant des signes de fusion, mais une Le composant est beaucoup plus petit que l'autre. Une fusion majeure (M) comporte deux galaxies de luminosité en train de fusionner, tandis qu'un reste de fusion (MR) est un état suffisamment avancé pour que les composants fusionnés ne soient plus distincts.

10.3.4. Galaxies infrarouges ultra-lumineuses

Les galaxies infrarouges brillantes identifiées pour la première fois par Rieke sont liées aux systèmes en interaction. & Low (1972) basé sur la photométrie 10 μm . À partir d'études basées sur l'astronomie infrarouge Satellite (IRAS), Sanders & Mirabel (1996) ont classé une galaxie comme une « galaxie infrarouge lumineuse ». galaxie » (LIRG) si sa luminosité dans la plage 8-1000 μm est comprise entre 10^{11} et 10^{12} L . Si la luminosité dans la même plage de longueurs d'onde dépasse 10^{12} L , alors l'objet est appelé une « galaxie infrarouge ultra-lumineuse » (ULIRG). Des études détaillées ont montré qu'à haute les redshifts, LIRGS et ULIRGS sont une population dominante d'objets (voir discussion dans Pereira-Santaella et al. 2010).

Les morphologies de neuf ULIRGS ont été étudiées à l'aide d'images HST en bande B et I par Surace et coll. (1998). Leur montage de six de ces objets est illustré à la figure 31. Dans tous les cas, il existe des signes évidents d'interactions, et tous sont probablement liés à des fusions ou à des fusions. fusions en cours. Plusieurs, comme Mk 231, possèdent des noyaux Seyfert brillants. Arribas et coll. (2004) obtenu une imagerie approfondie des LIRGS locaux et trouvé une proportion élevée similaire de fortement systèmes qui interagissent et fusionnent.

Le taux de fusion est considéré comme l'un des paramètres les plus importants pour comprendre évolution de la galaxie. Il a été difficile à estimer et les questions qui y sont liées sont discutées par Jogee et al. (2009 ; voir aussi Conselice 2009). Une fusion est considérée comme majeure si elle implique un compagnon allant de 1/4 à une masse approximativement égale à celle de la galaxie principale. Un important

la fusion de deux galaxies spirales peut détruire les deux disques et conduire à un ¹ Reste du profil de 4 lois

par une violente relaxation. Les fusions mineures impliquent des compagnons ayant 1/10 à 1/4 de la masse de la galaxie principale. Les deux types de fusions, bien qu'en cours, peuvent donner lieu à de nombreux caractéristiques morphologiques telles que des formes très déformées, des queues et des ponts de marée, des coquillages et ondulations et déformations. On pense même que certaines barres et motifs en spirale sont liés à les interactions, et en particulier les galaxies à double noyau, sont considérées comme des fusions. Comme discuté dans la section 10.1, les fusions ou collisions peuvent également être au cœur de morphologies rares telles que les galaxies en anneau et en anneau polaire. À l'aide de classifications visuelles des types de fusion, Jogee et Al. (2009) estiment que 16 % des galaxies de masse élevée ont connu une fusion majeure, tandis que 45 % ont connu une fusion mineure au cours des 3 à 7 dernières années ($z=0,24-0,80$).

10.4. Déformations

Une déformation est une courbure apparente ou une légère torsion de la forme du disque d'une galaxie spirale. (voir Sellwood 2010 et les références qui y figurent). Dans une distorsion, les étoiles et les nuages de gaz se déplacent à peu près orbites circulaires, mais l'orientation de ces orbites par rapport au plan interne du disque change avec un rayon croissant. Les distorsions sont plus facilement détectées dans les galaxies de bord, car la courbure des orbites extérieures fait ressembler la galaxie à un signe intégral. Bien que souvent plus prononcées dans une carte HI, les déformations peuvent être observées dans les images optiques ordinaires de la tranche. galaxies. La figure 32 montre trois galaxies présentant une forte déformation optique du plan du disque. Dans deux des galaxies, le disque interne brillant n'est pas déformé, tandis qu'un disque externe plus pâle et plus épais La zone est tordue par rapport au disque interne. Dans l'UGC 3697, le gauchissement est exceptionnellement visible. En général, la déformation optique est moins grave que la déformation HI.

La déformation est un aspect très courant des galaxies spirales (par exemple, Binney 1992) et a été interprété en termes de perturbations (apports gazeux ou interactions) qui déclenchent la flexion instabilités (par exemple, Revaz & Pfenniger 2007). Garcia-Ruiz, Sancisi et Kuijken (2002)

angles de déformation HI estimés, l'angle entre le plan interne du disque et le plan linéaire supposé zone de déformation, comprise entre près de 0° et plus de 30° . Un résumé utile des précédents des études de distorsion sont fournies par Saha et al. (2009), qui examinent les rayons d'apparition de distorsion dans le milieu IR images. La théorie des déformations est revue par Sellwood (2010).

10.5. La morphologie des galaxies actives

La morphologie des galaxies actives (également appelées galaxies « excitées » par van den Bergh 1998) est important à considérer en raison d'un lien possible entre les caractéristiques morphologiques et l'alimentation du noyau actif. Les premières études ont montré une prépondérance de l'anneau, pseudoring et des caractéristiques de barres dans les galaxies de Seyfert suggérant que le lien était un gaz entraîné par des barres flux (Simkin, Su et Schwarz 1980). Plusieurs exemples de la morphologie de Seyfert et d'autres galaxies actives sont illustrées à la figure 33. Les classifications d'activité sont basées principalement sur la spectroscopie, pas sur la morphologie, et sont décrits par Veron-Cetty & Veron (2006).

Une étude détaillée des morphologies des galaxies actives par Hunt & Malkan (1999) a fourni résultats similaires aux premières études. Ces auteurs ont examiné les morphologies d'un grand échantillon de galaxies sélectionnées sur la base de leur émission de $12\text{ }\mu\text{m}$, et ont découvert que les anneaux extérieurs et les combinaisons d'anneaux intérieur/extérieur sont 3 à 4 fois plus élevées dans les galaxies de Seyfert que dans la normale spirales. En revanche, les bars apparaissent avec la même fréquence ($\approx 69\%$) à Seyferts que dans les spirales normales, tandis que pour les galaxies HII/starburst, la fréquence était beaucoup plus élevée ($>80\%$). Bien que les anneaux extérieurs se trouvent principalement dans les galaxies barrées, les barres ne favorisent pas l'activité nucléaire. activité des galaxies de Seyfert. Hunt & Malkan (1999) interprètent cette incohérence en termes de échelles de temps : il faut environ 3×10^9 ans pour qu'un anneau extérieur fermé se forme, une échelle de temps pendant qu'une barre peut affaiblir ou dissoudre. De ce fait, une fréquence de sonnerie élevée à Seyferts indiquerait un état évolutif avancé. Concernant le même problème, Comerçon et al. (2010) ont constaté que les anneaux nucléaires ne sont pas corrélés à la présence d'une activité nucléaire.

L'étude de Hunt & Malkan (1999) a utilisé principalement les classifications RC3 pour en déduire la barre fraction dans les galaxies actives. Ces classifications visuelles sont basées sur des images de lumière bleue et la poussière pourrait donc masquer certaines barres. Knapen et coll. (2000) ont utilisé la haute résolution images proche IR d'échantillons bien définis et méthodes de détection de barres quantitatives pour en déduire que les barres sont plus fréquentes dans les galaxies de Seyfert que dans un échantillon témoin de galaxies non actives galaxies : $79 \% \pm 7,5 \%$ contre $59 \% \pm 9 \%$ (voir aussi Laine et al. 2002). Laurikainen, Salo, & Buta (2004) sont arrivés à une conclusion similaire pour 180 galaxies de l'OSUBSGS, en se basant sur les images en bande H proche IR. Les premières études utilisaient des ajustements d'ellipse pour identifier les barres, tandis que Laurikainen et coll. utilisé l'analyse de Fourier.

McKernan, Ford et Reynolds (2010) considèrent également les anneaux extérieurs et les pseudo-anneaux comme sondes de modèles d'AGN alimentés par des interactions et des fusions. L'idée est qu'un l'anneau extérieur met beaucoup de temps à se former et est très fragile, étant sensible aux interactions et changements dans la vitesse du motif des barres (par exemple, Bagley et al. 2009). Une interaction peut changer un l'anneau extérieur fermé en un pseudo-anneau et pourrait éventuellement détruire l'anneau. Ainsi, les anneaux sont sondes de l'histoire des interactions des galaxies actives. McKernan et coll. je n'ai trouvé aucune différence entre les AGN trouvés dans les galaxies annelées et ceux trouvés dans les galaxies sans anneaux. Mais chez ceux qui portent des anneaux, les interactions récentes peuvent être exclues et l'activité peut être liée à processus évolutifs séculaires internes à court terme.

Bahcall et coll. (1997) ont présenté des images HST de 20 quasars lumineux à faible redshift observé avec un filtre à large bande V. La figure 34 est reproduite à partir de leur article et montre images des galaxies hôtes après suppression de la majeure partie de la lumière des quasars. Les images montrent une variété de morphologies, y compris des elliptiques, des paires en interaction, des systèmes avec des perturbations des marées et spirales d'apparence normale. Un exemple de ce dernier est PG1402+261 ($z=0,164$), qui est de type (R' $_1$)SB(rs)a basé en partie également sur l'image présentée à la figure 7 de Bahcall et coll. Basé sur le nombre d'hôtes montrant des signes d'interactions, ainsi que sur

nombre de compagnons, Bahcall et al. conclure que les interactions peuvent déclencher le quasar phénomène.

10.6. La morphologie des membres les plus brillants du cluster

Matthews, Morgan et Schmidt (1964) ont observé les morphologies optiques de la radio sources identifiées avec les membres les plus brillants des riches amas de galaxies. Ils ont constaté que la forme la plus courante était ce que Morgan (1958) appelait une galaxie « D », ce qui signifie une galaxie ayant une région intérieure de type elliptique entourée d'une vaste enveloppe (voir discussion dans van den Bergh 1998). Bien que ceux-ci ressemblaient superficiellement aux S0 de Hubble, aucun n'a été trouvé ayant une forme très allongée, ce qui implique que les galaxies ne sont pas aussi aplaties que S0 typiques. Une autre caractéristique des galaxies de l'amas D était leur très grande taille linéaire et une luminosité exceptionnelle, bien plus grande que celle d'un membre typique de l'amas. Pour désigner ces objets extrêmes dans le système Morgan, le préfixe c a été ajouté comme dans l'ancienne classification des étoiles supergéantes. Aujourd'hui encore, la notation « cD » de Morgan est utilisée pour décrire ces supergéants. galaxies qui sont généralement considérées comme sortant du cadre du système Hubble.

L'étude la plus détaillée des propriétés photométriques des membres les plus brillants de l'amas (BCM) a été réalisée par Schombert (1986, 1987, 1988 ; voir également diverses références dans ce document). Les principaux types de BCM pris en compte par Schombert étaient gE (elliptiques géants), D et cD, distingués principalement de l'apparence de la forme du profil. Les galaxies D sont plus grandes et plus diffuses avec des profils moins profonds que les galaxies gE, tandis qu'une galaxie cD est la même qu'une galaxie D mais avec une grande enveloppe étendue (Schombert 1987). Les enveloppes CD peuvent s'étendre jusqu'à 500 kpc ou plus. Kormendy et Djorgovski (1989) soutiennent que seules les galaxies CD sont suffisamment physiquement distinct des vélos elliptiques pour mériter d'être une classe distincte, et a recommandé que le « D » la classe ne soit pas utilisée.

Deux galaxies cD et deux galaxies gE sont représentées sur la figure 35. Pour donner une idée de la A l'échelle de ces objets, la dimension verticale des cadres correspond à 201, 232 et 132 kpc pour (de gauche à droite) UGC 10143 (A2152), NGC 4874/89 (A1656) et NGC 6041 (A2151), respectivement. La classification cD de NGC 4874 est due à Schombert (1988), et on peut voyez sur la figure 35 qu'il est beaucoup plus grand et a un profil de luminosité moins profond que celui à proximité NGC 4889. L'enveloppe cD est détectée comme un excès de lumière dans les régions extérieures par rapport à un profil de luminosité généralisé, et peut-être même pas la lumière qui conduit à l'image visuelle classification des CD.

Basé sur des écarts structurels tels que les grands rayons, les pentes de profil peu profondes et régions intérieures lumineuses, Schombert (1987) a conclu que les BCM correspondent bien aux prévisions de simulations de fusion, y compris l'accrétion et le « cannibalisme » de membres plus petits du cluster. Les propriétés des enveloppes cD (telles que séparées photométriquement de la galaxie mère) peuvent suggèrent un processus de décapage pour leur formation (Schombert 1988).

Comme indiqué dans la section 5.1, de nombreux BCM du RC3 ont reçu la classification E+, ce qui suggère que les profils de luminosité caractéristiques laissent entrevoir une enveloppe interprétée comme un disque naissant. La distribution des rapports axiaux des CD est en réalité plus plate que elliptiques normaux (Schombert 1986), mais il n'est pas clair que les enveloppes perçues dans le BCM Les galaxies E + sont en réalité aussi aplaties qu'un disque typique. Un exemple local de galaxie gE est M87, classé type E+0-1 par de Vaucouleurs.

11. Morphologies des formations stellaires

11.1. Imagerie H α

La bande d'onde standard pour la classification des galaxies, la bande B, est suffisamment sensible à la population extrême, je composante que le degré de résolution des bras spiraux en

les complexes formant des étoiles font partie de la classification. Cependant, la bande B comprend également une contribution substantielle de l'arrière-plan stellaire plus ancien. Une façon d'isoler uniquement les régions de formation d'étoiles dans une galaxie sont représentées dans $H\alpha$, qui trace les régions HII. En dehors de montrant la répartition de la formation des étoiles (modifiée par l'extinction), l'imagerie $H\alpha$ trace également le taux de photoionisation globale, qui à son tour retrace directement le taux de formation d'étoiles plus massives qu'environ $10 M_{\odot}$ (Kennicutt, Tamblyn et Congdon 1994). La première fonction de masse (FMI), supposée ou contrainte d'une manière ou d'une autre (en utilisant, par exemple, couleurs à large bande), permet de convertir les flux $H\alpha$ en taux total de formation d'étoiles sur toutes les masses stellaires.

L'imagerie $H\alpha$ montre souvent des modèles bien organisés de régions HII qui suivent les structures comme des bras en spirale et surtout des anneaux. Images de six types annelés précoces à intermédiaires les galaxies sont illustrées à la figure 36 (Crocker, Baugus et Buta 1996). La manière dont l'imagerie $H\alpha$ fonctionne généralement si une galaxie est imagée dans ou à proximité de sa longueur d'onde $H\alpha$ décalée vers le rouge, puis dans une longueur d'onde du continuum rouge proche. L'image $H\alpha$ nette est la différence entre l'image $H\alpha$ l'image et l'image du continuum rouge à l'échelle. Souvent, le filtre $H\alpha$ utilisé est suffisamment large pour inclure les émissions de [NII] 6548 et 6584. Pour chacune des galaxies illustrées à la figure 36, le L'image de gauche est l'image du continuum rouge, tandis que l'image de droite est l'image $H\alpha$ nette. De la quatre spirales barrées illustrées (NGC 1433, 7329, 6782 et 7267), trois ne montrent aucune région HII associé au bar. Ces trois (NGC 1433, 7329 et 6782) ont tous des anneaux intérieurs bordés de régions HII. Comme le montrent Crocker, Baugus et Buta (1996), la distribution des régions HII autour des anneaux internes est sensible à la forme intrinsèque du anneau. Lorsque l'anneau est très allongé, les régions HII se concentrent autour des extrémités de l'anneau. grand axe (qui coïncide avec l'axe de la barre ; NGC 6782), tandis que lorsque l'anneau est circulaire, les régions HII sont réparties plus uniformément autour de l'anneau (NGC 7329). Formes de bague intérieure ne correspondent pas bien aux couples de barre relatifs maximaux dans une galaxie (dVA), mais Grouchy et coll. (2010) ont montré que lorsque le forçage local est plutôt pris en compte, les formes d'anneaux et de barres

les points forts sont bien corrélés.

Le cas de NGC 7267 est différent dans la mesure où la majeure partie de son émission de H α est concentrée dans le bar. Martin et Friedli (1997) ont soutenu que la formation d'étoiles le long des barres galactiques pourrait fournir des indices sur le flux de gaz dans les régions intérieures des galaxies et sur l'alimentation des explosions d'étoiles et AGN. Ces auteurs présentent des modèles qui suggèrent une évolution à partir d'une barre H α pure, à une barre H α avec du gaz ionisé au centre, à une barre pauvre en gaz à fort potentiel nucléaire ou formation d'étoiles circumnucléaires. Cela suggère que la barre de NGC 7267 est plus jeune que ceux de NGC 1433, 7329 et 6782.

Les deux autres galaxies représentées sur la figure 36 sont non ou faiblement barrées. MBAC 6935 est un cas intéressant où une galaxie non barrée possède un fort anneau de formation d'étoiles. Grouchy et coll. (2010) ont découvert que les propriétés de formation d'étoiles des anneaux intérieurs, mais pas distribution des régions HII, sont indépendantes des formes d'anneaux et de la résistance des barres dans un petit échantillon. Le cas de NGC 7702 est différent des autres. Il s'agit d'un S0 tardif (type S0+) montrant un anneau intérieur très fort et largement stellaire. L'anneau montre peu de gaz ionisé et semble être dans une phase tranquille d'évolution.

11.2. Imagerie ultraviolette

La meilleure imagerie globale des galaxies proches dans les longueurs d'onde ultraviolettes a été obtenue avec le Galaxy Evolution Explorer (GALEX, Martin et al. 2005), qui a fourni des informations détaillées images de galaxies de tous types aux longueurs d'onde de 0,225 et 0,152 μm . Ces images révèlent les jeunes étoiles ont généralement moins de ≈ 100 Myr mais sont affectées par l'extinction des poussières. Il y a une forte corrélation entre la morphologie UV et la morphologie H α (Figure 37). Comme H α , les flux UV des galaxies peuvent être utilisés pour estimer les taux de formation d'étoiles une fois éteintes est estimé et sont particulièrement sensibles au rapport entre le présent et le passé moyen.

taux de formation d'étoiles. L'imagerie UV est un moyen efficace de découpler la récente formation d'étoiles l'histoire d'une galaxie à partir de son histoire globale et à long terme de formation d'étoiles.

La figure 38 montre des images dans le proche UV (0,225 μm) de huit galaxies sur une distance de Hubble. les types. Les deux premiers types, NGC 1317 et 4314 (tous deux Sa), présentent une morphologie proche des UV. dominé par un anneau circumnucléaire brillant de formation d'étoiles. La galaxie SB(r)b NGC 3351 montre un anneau intérieur bien visible de formation d'étoiles et peu d'émissions de sa région de barre. En revanche, la galaxie SBc NGC 7479 présente une forte émission proche UV de sa barre. Le les galaxies de type tardif NGC 628 [type SA(s)c] et NGC 5474 [type SA(s)m] sont typiques de leur types, mais le plus intéressant est NGC 4625. Une découverte clé de GALEX était l'extension des rayons UV émission bien au-delà de l'étendue optique de certaines galaxies. NGC 4625 est un exemple où la partie optique principale [type SABm] ne représente qu'une petite fraction de l'étendue du disque UV (Gil de Paz et coll. 2005).

L'objet final illustré à la figure 38 est NGC 5253, un exemple de base de ce que de Vaucouleurs classé I0 (rubrique 5.3). La région intérieure est une zone carrée brillante d'étoile formation, et même le disque étendu est proéminent.

11.3. Morphologie atomique et moléculaire des gaz

Les distributions des atomes et des molécules sont liées aux morphologies de la formation des étoiles. gaz. Loin d'être des nuages de matière interstellaire répartis aléatoirement, atomiques et les morphologies moléculaires des gaz peuvent être des modèles très organisés et bien définis. Un sommet récent des enquêtes de qualité ont fourni certaines des meilleures cartes de ces distributions en temps normal galaxies. L'hydrogène atomique est cartographié avec la raie d'émission à structure fine de 21 cm, qui a l'avantage de ne pas être affecté par l'extinction et d'être suffisamment mince optiquement général pour permettre aux masses HI totales d'être dérivées directement des cartes de luminosité de surface HI.

De plus, les cartes HI fournissent des informations sur la cinématique et la dynamique de l'ISM, ainsi que bien sur l'existence et la répartition de la matière noire dans les galaxies. L'hydrogène moléculaire est généralement cartographié en utilisant la transition de rotation $12\text{CO J} = 1-0$ à une longueur d'onde de 2,6 mm, sous l'hypothèse que le CO et l'hydrogène se mélangent dans une proportion à peu près fixe.

Bien que de nombreuses cartes aient été réalisées sur la distribution de HI dans les galaxies proches, l'enquête la plus sophistiquée et la plus détaillée réalisée à ce jour est l'enquête « The HI Near Galaxies Enquête » (THINGS, Walter et al. 2008). Les premières enquêtes avaient montré que l'HI est un traceur de la structure spirale dans les galaxies, et THINGS fournit certaines des cartes de la plus haute qualité révélant cette corrélation ainsi que d'autres caractéristiques. D'un point de vue morphologique vue, les cartes HI ont tendance à révéler : (1) une luminosité de surface améliorée dans les caractéristiques de formation d'étoiles telles que comme bras spiraux, anneaux et pseudo-anneaux ; (2) disques gazeux étendus, tels que l'étendue HI peut dépasser l'étendue optique de plusieurs fois ; et (3) la formation d'étoiles et de supernova trous creusés et soufflés par le vent.

La figure 39 montre les morphologies HI de huit galaxies THINGS allant du Sab galaxie NGC 4736 à la galaxie Sm DDO 50 (Holmberg II). Galaxies Sc brillantes comme NGC 628 (M74) et NGC 5236 (M83) montrent des distributions HI qui s'étendent bien au-delà du champ optique. disques. Ces motifs étendus peuvent inclure de grandes spirales comme dans NGC 628. Dans M81 et M83, le HI trace bien la structure optique en spirale. De grands anneaux ou pseudo-anneaux sont observés dans NGC 2841 et NGC 4258, tandis que M81 montre un anneau de gaz à échelle intermédiaire qui est beaucoup moins évident optiquement. L'anneau intérieur brillant formant une étoile dans NGC 4736 est bien défini et facilement distingué dans HI, mais l'anneau extérieur stellaire diffus de la galaxie est plutôt asymétrique. zone en spirale.

Les plus intéressants sur les cartes HI sont les trous évidents où il semble y avoir un carence en gaz neutre par rapport aux régions environnantes. Des trous particulièrement grands sont visibles dans la morphologie HI du nain de type tardif DDO 50. On pense que ces trous sont des régions

dégagé par les vents stellaires et les explosions d'étoiles massives contenues ou autrefois contenues en eux. Les trous ont une taille de 100 à 2 kpc et ont des propriétés systématiques différentes dans les galaxies de type précoce et tardif dans le sens où les trous peuvent durer plus longtemps dans les galaxies naines de type tardif en raison de l'absence de cisaillement important dû à une forte rotation différentielle (Bagetakos et al. 2009). Des trous peuvent également être trouvés en dehors du diamètre angulaire optique isophotique standard.

La galaxie naine DDO 154 illustrée à la figure 39 présente l'un des plus grands ratios HI: diamètre optique, un facteur 6 au moins selon Carignan & Purton (1998), qui ont également On estime que 90 % de la masse de la galaxie est sous forme de matière noire. Le HI et les morphologies optiques se ressemblent peu. Un autre exemple de forte non corrélées aux morphologies HI et optiques est NGC 2915, une galaxie très riche en gaz dont La morphologie est une naine compacte bleue tandis que sa morphologie HI au moins 5 fois plus grande comprend une spirale externe proéminente sans contrepartie optique (Meurer et al. 1996), conduisant à la concept de pure « spirale sombre ». Bertin & Amorisco (2010) envisagent une interprétation générale de si grandes spirales HI externes, en particulier celles observées dans des galaxies comme NGC 628 et NGC 6946 : les spirales représentent de courtes ondes traînantes qui transportent le moment cinétique vers l'extérieur de la corotation et, au moins dans la composante gazeuse, pénètre une barrière normale au niveau OLR du motif du disque stellaire et allez loin dans le disque HI. Les courtes ondes traînantes sont censé exciter les bras spiraux globaux observés dans le corps optique principal de la galaxie (où les spirales optiques proéminentes de NGC 628 et NGC 6946 sont trouvées). Comment NGC 2915 s'adapte cette image n'est pas claire puisque le corps stellaire principal de cette galaxie n'est pas un grand dessein spirale.

Galaxies dont les disques HI ne s'étendent pas beaucoup au-delà de la distribution optique de la lumière sont également intéressants. NGC 4736 sur la figure 39 en est un exemple. Le grand, annelé à proximité la spirale barrée NGC 1433 a été trouvée par Ryder et al. (1996) pour avoir de l'hydrogène gazeux neutre concentré dans sa zone centrale, son anneau intérieur et son pseudo-anneau extérieur, sans gaz

en dehors de la lumière visible du disque et une quantité de gaz inférieure dans la région de la barre par rapport à la régions annulaires. Higdon et coll. (1998) ont montré que dans la spirale annelée et barrée NGC 5850, le gaz neutre est concentré dans la bague intérieure et dans le modèle de bras extérieur asymétrique, avec peu ou pas d'émission détectée en dehors de ce modèle. L'asymétrie a conduit Higdon et al. à suggèrent que NGC 5850 a peut-être subi une collision à grande vitesse avec NGC à proximité 5846.

Dans les amas de galaxies, il est bien connu que les effets environnementaux peuvent tronquer un disque HI de sorte qu'il est plus petit que la lumière du disque optique. Ceci est illustré de manière spectaculaire dans le haut cartes VLA HI de résolution des galaxies de l'amas de la Vierge par Chung et al. (2009), qui ont constaté que les galaxies à moins de 0,5 Mpc du noyau de l'amas ont des disques HI sévèrement tronqués, généralement moins plus de la moitié de la taille du diamètre isohotal standard optique, D25. Une variété d'études antérieures avait déjà montré que ces galaxies étaient déficientes en HI par rapport aux galaxies de champ de même les types. Comme indiqué dans la section 10.2, une interaction entre l'ISM d'un amas de galaxies et le Le milieu intra-cluster peut expliquer ces modifications inhabituelles de la morphologie de l'HI. Chung et coll. fournissent également des preuves de cette interaction dans certaines morphologies qui semblent être gazeuses décapage en cours.

L'enquête Berkeley-Illinois-Maryland sur les galaxies voisines (BIMA SONG ; Regan et Al. 2001 ; Helfer et coll. 2003) ont fourni certaines des cartes de CO de la plus haute qualité de la normale galaxies. L'émission de CO est souvent observée dans les galaxies intermédiaires (Sab-Sd), qui ont une teneur en gaz et métallicité suffisantes pour permettre à la raie d'émission $12\text{CO } J = 1-0$ 2,6 mm d'être détectable. Les distributions de CO de huit de ces galaxies issues de cette étude sont présentées dans Figure 40. Celles-ci présentent une partie de la gamme de morphologies moléculaires des gaz observées. Traces de CO les bras spiraux internes de NGC 628, 1068 et 4535, et est visible le long de la barre de NGC 2903. Une morphologie courante du CO est un anneau de grand diamètre de nuages moléculaires géants (GMC), sans concentration centrale de CO, comme on le voit dans NGC 2841 et 7331. Les anneaux sont les

pics de distributions en déclin exponentiel. L'anneau gazeux moléculaire interne cohérent dans NGC 7331 ressemble davantage à un anneau de résonance typique et possède une valeur moléculaire estimée en gaz masse de $3,4 \times 10^9 M_{\odot}$ (Regan et al. 2004). La distribution du CO dans NGC 2403 semble être concentrée dans des GMC individuels, avec peu d'émission diffuse, tandis que celle de NGC 3351 est caractérisé par une petite barre centrale alignée presque perpendiculairement à l'élément principal de la galaxie. bar. Helfer et coll. (2003) montrent que la Voie Lactée, M31 et M33 ont des morphologies CO qui correspondent à la gamme de morphologies trouvées par BIMA SONG.

12. Observations infrarouges : morphologie de la masse stellaire galactique

Les observations infrarouges présentent des avantages considérables par rapport aux observations optiques de galaxies. Alors que les images traditionnelles en bande B sont sensibles à la poussière et à l'extinction (les deux interne et externe), les effets de l'extinction dans le proche et le moyen IR sont bien moindres, et devenir pratiquement négligeable à $3,6 \mu\text{m}$. Galaxies spirales imagées successivement à des longueurs d'onde plus longue que la bande B, devient progressivement plus lisse, non seulement en raison de la réduction effet d'extinction, mais aussi à la désaccentuation de la jeune composante stellaire bleue. La combinaison de ces effets a conduit à l'idée populaire selon laquelle l'imagerie IR révèle les « étoiles » « l'épine dorsale » des galaxies, c'est-à-dire la distribution de la masse stellaire réelle (par exemple, Rix & Rieke 1993 ; Block et coll. 1994). Ainsi, l'imagerie infrarouge est devenue un incontournable pour les études de la potentiel gravitationnel et distribution de la masse stellaire dans les galaxies (par exemple Quillen, Frogel, & Gonz'alez 1994), et pour la quantification de la résistance des barres à partir du maximum relatif couples gravitationnels (par exemple, Buta & Block 2001; Laurikainen & Salo 2002).

L'imagerie infrarouge a également révélé des structures externes intéressantes telles que le grand arcs rouges observés dans M33, qui ont été interprétés par Block et al. (2004b) être des andains d'étoiles de carbone extrêmement lumineuses formées par accrétion externe de gaz à faible métallicité. L'analyse du spectre de puissance des structures IR dans les spirales classiques a été utilisée pour détecter

« flux d'étoiles » azimutaux et évaluer le rôle de la turbulence sur la formation des étoiles et la spirale structure (Block et al. 2009 et références qui y figurent).

L'imagerie proche infrarouge de 0,8 à 2,2 μm peut être obtenue avec succès à partir d'images au sol observatoires mais avec le sérieux inconvénient que la luminosité du fond du ciel augmente considérablement dans cette fourchette. En conséquence, il n'a pas été possible d'obtenir une profondeur d'exposition à, par exemple, 2,2 μm , comparable aux types de profondeurs réalisables à longueurs d'onde optiques sans temps d'observation excessif. Le premier grand proche IR conçu pour des études morphologiques à grande échelle était l'Ohio State University Bright Spiral Galaxy Survey (OSUBSGS, Eskridge et al. 2002), qui comprenait le BV RI optique et des images JHK proche IR de 205 galaxies brillantes de types S0/a à Sm de manière statistiquement échantillon bien défini sélectionné pour avoir une magnitude bleue totale $B_T \leq 12,0$ et un diamètre isophotal $D_{25} \leq 6''.5$. Cette étude a permis de démontrer directement comment la morphologie des galaxies passe des longueurs d'onde optiques aux longueurs d'onde proches de l'infrarouge, pas seulement pour un petit échantillon sélectionné de galaxies, mais pour un large échantillon couvrant tous les sous-types spiralés. Le principal filtre proche IR utilisé dans cette étude était la bande H à 1,65 μm .

L'OSUBSGS a ensuite été complété par l'enquête S0 dans le proche infrarouge (NIRS0S, Laurikainen et coll. 2005, 2006, 2007, 2009, 2010 ; Buta et coll. 2006), une étude d'imagerie en bande Ks étude de 174 galaxies de type précoce dans la gamme de types S0- à Sa, mais comprenant principalement des S0, dont certains ont été classés à tort comme elliptiques dans RC3. Les images NIRS0S sont plus profondes que Images OSUBSGS proche IR grâce à l'utilisation de télescopes plus grands et à des temps d'utilisation de la source plus longs. Bien que les galaxies S0 soient dominées par de vieilles étoiles et soient généralement lisses même sous la lumière bleue images, la bande Ks a été choisie pour compléter l'échantillon de spirales OSUBSGS afin faire une comparaison équitable entre la résistance des barres et les propriétés de renflement des S0 et des spirales. De plus, les galaxies S0 ne sont pas nécessairement exemptes de poussière, et l'imagerie proche infrarouge est toujours nécessaire pour les détecter. pénétrer la poussière qu'ils ont. NIRS0S a conduit à plusieurs découvertes importantes sur S0

galaxies : (1) une classe de S0, non reconnue auparavant, ayant des lentilles proéminentes mais très petits renflements plus typiques des galaxies Sc que des spirales de type antérieur (exemple : NGC 1411, Laurikainen et coll. 2006); (2) des preuves considérables que les galaxies S0 ont des pseudobulges tout comme dans de nombreuses spirales (Laurikainen et al. 2007). Même si les renflements de ces derniers sont probables être constitués d'un matériau de disque réarrangé dans de nombreux cas (section 9), ceux des S0 sont susceptibles de être lié à l'évolution des bars. Les renflements S0 ont tendance à être presque exponentiels (indice Sersic $n \leq 2$), sont soutenus contre la gravité par rotation plutôt que par des mouvements aléatoires, et souvent inclure des disques internes transparents ; (3) bonnes corrélations entre les rayons effectifs de renflement, le r_e et le disque longueur d'échelle radiale, h_R , ainsi qu'entre les magnitudes absolues du renflement dans la bande Ks et le disque, suggèrent que les renflements S0 ne sont pas formés à partir de fusions hiérarchiques, ce qui implique que Les S0 pourraient être des spirales dénudées, bien que la fraction de barre inférieure dans les S0 suggère que cela se situe dans conjonction avec l'évolution due aux barres et aux ovales ; (4) 70% des galaxies S0-S0/a ont des ovales ou des lentilles, suggérant que les barres se sont affaiblies dans ces galaxies au fil du temps ; et (5) non seuls les renflements, mais aussi les disques de S0 sont similaires à ceux des spirales S0/a-Scd.

Le Two-Micron All-Sky Survey (2MASS, Skrutskie et al. 2006) a fourni des données en proche IR Images JHK d'un échantillon de galaxies beaucoup plus grand que l'OSUBSGS ou le NIRS0S, bien que ces images n'aient pas la profondeur des images OSUBSGS et NIRS0S en général. 2MASS a fourni des informations considérables sur la morphologie des galaxies dans le proche infrarouge, ce qui a conduit à au vaste Atlas des grandes galaxies 2MASS (Jarrett et al. 2003).

La meilleure imagerie des galaxies dans les longueurs d'onde infrarouge moyenne a été obtenue avec le Télescope spatial Spitzer utilisant la caméra infrarouge (IRAC, Fazio et al. 2004) et Filtres 3,6, 4,5, 5,8 et 8,0 μm . Les filtres de 3,6 et 4,5 μm offrent le maximum d'extinction vues de la distribution de masse stellaire dans les galaxies, tandis que les filtres de 5,8 et 8,0 μm révèlent le milieu interstellaire (ISM) (Pahre et al. 2004). La perte de liquide de refroidissement en 2008 a empêché d'autres observations avec les filtres de 5,8 et 8,0 μm , mais les filtres de 3,6 et 4,5 μm pourraient encore

être utilisé. Cela a conduit à l'étude Spitzer sur la structure stellaire des galaxies (S4G, Sheth et al. 2010), une étude à 3,6 et 4,5 μm de 2 331 galaxies de tous types à une distance inférieure à 40 Mpc. Ces longueurs d'onde échantillonnent le déclin de Rayleigh-Jeans de la distribution d'énergie spectrale stellaire de toutes les étoiles sont plus chaudes que 2000K. Les images S4G présentées ici proviennent de Buta et al. (2010a) et sont basées sur des images d'archives préalables à l'enquête traitées de la même manière que les images d'enquête. Spitzer les observations ont un fond très faible par rapport aux observations au sol proche IR, et donc les images IRAC sont les images de galaxies les plus profondes jamais obtenues dans l'IR.

La figure 41 compare les images de M51 à quatre longueurs d'onde : la bande GALEX 0,15 μm , la bande B (0,44 μm), bande Ks proche infrarouge (2,2 μm) et bande IRAC 3,6 μm . Seulement les images en bandes B et Ks proviennent d'observations au sol. L'image GALEX révèle la formation d'étoiles étendue dans les bras spiraux et absence totale de formation d'étoiles dans le compagnon NGC 5195 ainsi que dans le matériel de marée complexe au nord du compagnon. La formation d'étoiles dans les bras est plus discrète dans la bande B et presque complètement modérée dans la bande Ks. Les bras sont si lisses dans la bande Ks que la galaxie ressemble à un système Sa ou Sab. (Le type de bande B est Sbc.) Étonnamment, ce n'est pas le cas dans l'image de 3,6 μm dont la profondeur considérablement plus grande par rapport à l'image en bande Ks est évidente. Les bras spiraux de la bande de 3,6 μm sont bordés de nombreux objets résolus, dont beaucoup sont corrélés aux régions de formation d'étoiles observées dans la bande B. Cela se voit de façon spectaculaire également dans la galaxie SB(s)cd NGC 1559 (Figure 42), où une image IRAC 3,6 μm est comparée avec une image en bande B. Celles-ci montrent que les caractéristiques résolues dans l'image profonde de 3,6 μm sont bien corrélées avec les complexes de formation d'étoiles en bande B. Ainsi, les images IR moyen de 3,6 μm ne sont pas complètement exemptes des effets de la composante stellaire extrême de la population I (voir discussions dans Block et coll. 2009 et Buta et coll. 2010a).

Un échantillonnage d'images S4G comparé aux images en bande B pour les mêmes galaxies de la dVA est illustré à la figure 43. Les quatre galaxies représentées, NGC 584, 1097, 628 et 428,

ont des types dVA de S0–, SBb, Sc et Sm, respectivement, couvrant ainsi presque tout le Séquence Hubble-de Vaucouleurs. Bien que le système interactif très poussiéreux NGC 1097 semble légèrement « plus précoce » à $3,6\mu\text{m}$, ces images montrent encore que dans l'ensemble la morphologie dans les deux bandes d'ondes est très similaire. La même chose est observée pour d'autres galaxies décrites par Buta et coll. (2010a), qui ont découvert que les types de $3,6\mu\text{m}$, jugés en utilisant les mêmes préceptes décrits dans le dVA pour les images de lumière bleue est bien corrélé aux types de lumière bleue. En moyenne à mi-IR les classifications des galaxies RC3 S0/a-Sc sont environ 1 intervalle plus tôt que la bande B classifications, avec peu de différence pour les types en dehors de cette plage. La corrélation est beaucoup meilleur que ce qui était attendu des études précédentes dans le proche IR (Eskridge et al. 2002). $3,6\mu\text{m}$ la morphologie des galaxies est suffisamment contaminée par la formation récente d'étoiles pour permettre la même critères définis pour les images de lumière bleue à utiliser pour la classification des galaxies, un résultat surprenant.

Des différences drastiques entre la morphologie de $3,6\mu\text{m}$ et la bande B ne sont visibles que pour la plupart galaxies poussiéreuses. Un exemple est NGC 5195, également illustré sur la figure 41. Cette galaxie, classée comme Irr II dans l'Atlas de Hubble et comme I0 par de Vaucouleurs, apparaît comme un type précoce régulier galaxie de type SAB(r)0/a (voir aussi Block et al. 1994). D'autres galaxies qui peuvent paraître très différentes sont les spirales flocculantes telles que NGC 5055 (Figure 44). La flocculation en grande partie disparaît à $3,6\mu\text{m}$ et une tendance plus globale est observée (voir aussi Thornley 1996). Le type de NGC 5055, Sbc, reste largement inchangé de B à $3,6\mu\text{m}$.

Comme l'ont noté Helou et al. (2004), le domaine de longueur d'onde moyen IR marque la transition d'une émission dominée par la lumière des étoiles à une émission dominée par la poussière interstellaire. Alors que les images à $3,6\mu\text{m}$ montrent le renflement et le disque stellaires presque totalement exempts d'extinction de poussière, une image à $8\mu\text{m}$ montre très peu de lumière stellaire mais une émission considérable de l'ISM dans le forme de poussière rougeoyante.

La figure 45 montre une image de $8\mu\text{m}$ de la galaxie spirale voisine M81 par rapport à une image B – I.

carte d'index de couleurs codée de telle sorte que les éléments de formation d'étoiles bleues soient sombres tandis que les bandes de poussière rouges

sont légers. L'image 8 μ m de M81 montre que son ISM est étroitement associé à sa spirale bras. La comparaison avec l'indice de couleur B – I montre que les bras formant des étoiles ainsi que ainsi que des bandes de poussière proches du côté peuvent être vues à 8 μ m. Même les voies les plus éloignées dans la région du renflement sont claires à 8 μ m, où aucune asymétrie d'inclinaison ne se manifeste. Willner et coll. (2004) soutiennent que les émissions de poussières de l'ISM de M81 sont probablement dominées par des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP ; Gillett et al. 1973) qui ont une caractéristique d'émission importante à 7,7 μ m. Willner et Al. a également montré une bonne correspondance entre l'émission de poussières non stellaires dans M81 et la distribution des émissions du proche ultraviolet (NUV). Certaines régions avec des émissions de poussières brillantes et les faibles émissions de NUV ont été attribuées à une extinction excessive des UV, tandis que les zones à forte luminosité Les NUV et les faibles émissions de poussières ont été attribuées aux effets des supernovae.

La carte d'index de couleurs B – I de M81 montre un ensemble supplémentaire de bandes de poussière qui n'ont pas de homologue dans la carte 8 μ m. Ces voies sont orientées à peu près perpendiculairement aux principales axe à peu près à mi-chemin entre le centre et le bras nord. Sandage et Bedke (1994) interprètent-les comme de la poussière de premier plan associée à des nébulosités de haute latitude galactique dans le halo de notre Galaxie.

13. Morphologie des galaxies à redshift intermédiaire et élevé

La clé pour détecter des preuves observables de l'évolution des galaxies, c'est-à-dire pour voir réellement différences morphologiques probablement imputables à l'évolution, consiste à observer les galaxies à redshift élevé avec une résolution suffisante pour révéler des détails significatifs de la morphologie. Boucher & Oemler (1978) avaient déjà trouvé des preuves solides d'une évolution morphologique chez nombre excessif de galaxies bleues dans des amas de galaxies riches et très éloignés ($z = 0,4-0,5$). Ces Les auteurs suggèrent que les galaxies bleues sont des galaxies spirales et qu'à l'époque actuelle, ce sont les galaxies qui deviennent les S0 qui dominent les amas riches et détendus à proximité (comme l'amas de Coma, Abell 1656). Un excellent résumé des enjeux liés à la haute

Des études morphologiques sur le redshift sont fournies par van den Bergh (1998).

Les progrès sur la morphologie des galaxies à redshift élevé ne pourraient être réalisés qu'avec le résolution et profondeur du télescope spatial Hubble. Le champ profond de Hubble Nord (HDF-N, Williams et al. 1996), Sud (HDFS, Volonteri et al. 2000) et Ultra-Deep Field (UDF, Beckwith et al. 2006) et le GOODS (Great Observatories Origins Deep Enquête; Giavalisco et coll. 2004), GEMS (Galaxy Evolution from Morphology et SEDS ; Rix et coll. 2004), COSMOS (Cosmic Evolution Survey; Scoville et al. 2007) et d'autres enquêtes (par exemple Cowie et al. 1995), ont fourni un vaste ensemble d'informations sur lesquelles travailler. Pour Par exemple, des études de galaxies dans la plage de redshift $0,3 \leq z \leq 0,9$ montrent que la proportion de galaxies de forme irrégulière augmente considérablement (par exemple, Abraham et al. 1996). Cela signifie que la séquence de Hubble telle que nous la connaissons n'a pas toujours existé mais s'est construite au fil du temps via fusions ou évolution séculaire, ou les deux. Observations de sources submillimétriques (Chapman et Al. 2003) suggèrent que certaines de ces irrégularités sont des fusions majeures prolongées.

L'interprétation de l'évolution dans les différentes enquêtes approfondies dépend de la connaissance des redshifts, qui peuvent être difficiles à mesurer spectroscopiquement. Une technique très utile pour isoler les galaxies dans des plages de redshift élevées est la méthode d'abandon des UV (Steidel & Hamilton 1992). Les galaxies sont comparées dans différents filtres, tels que B435, V606, i775 et z850. Si la le redshift est suffisamment élevé pour déplacer la limite de Lyman à $0,0912 \mu\text{m}$ sur l'un des trois premiers filtres, il y aura une baisse significative du flux due à l'absorption par l'hydrogène, et le on dit que la galaxie « abandonne ». Les galaxies ainsi découvertes sont appelées galaxies à « rupture de Lyman ». car cet effet est en partie dû aux caractéristiques spectrales des étoiles chaudes, qui montrent une telle pause. (Une autre cause est l'auto-absorption des UV.)

Steidel et coll. (1996) ont utilisé l'approche d'abandon des UV pour identifier les galaxies à z élevé dans le HDF-N, et a également utilisé la spectroscopie directe pour confirmer que la méthode fonctionne. Beckwith et Al. (2006) ont utilisé la méthode pour identifier les galaxies dans le UDF ayant un z compris entre 3,5 et 7. Si

on voit une galaxie sortir d'un filtre en bande U tel que F300W et vue dans un filtre en bande B comme le F450W (tous deux utilisés pour le HDF-N ; Williams et al. 1996), puis la plage de redshift sélectionné est $z=2,4$ à $3,4$. van den Bergh (1998) soutient que la plupart des galaxies à rupture de Lyman sont jeunes elliptiques ou renflements.

Van den Bergh et coll. (2000) décrivent les enjeux liés à la morphologie classifications des galaxies à des redshifts de $z \approx 1$. Résolution, changement de bande et sélection Les effets dus à la nature limitée des enquêtes entrent tous dans l'interprétation de morphologie des galaxies à redshift intermédiaire à élevé. La résolution est importante car, généralement, une galaxie proche aura 100 fois ou plus de pixels dans l'image qu'une galaxie à z élevé avoir pour la classification. Cela représente moins de pixels que ne le feraient les images d'observation du ciel de galaxies proches. avoir. L'effet passe-bande est important car la bande B, la longueur d'onde standard pour classification historique des galaxies, n'échantillonne pas la même partie du spectre qu'elle le ferait pour les galaxies proches. Par exemple, à $z = 1$, un filtre en bande B échantillonne la lumière ultraviolette moyenne. ($\approx 0,22 \mu\text{m}$) et serait beaucoup plus sensible aux jeunes régions de formation d'étoiles qu'elle ne le serait. être pour les galaxies proches. Idéalement donc, pour une comparaison avec les galaxies proches, nous aimerions choisissez une bande décalée vers le rouge aussi proche que possible de la bande B de la trame de repos. Même en tenant compte tous ces effets, des différences significatives entre morphologies proches et lointaines existent. Par exemple, van den Bergh et al. (2000) discutent de la rareté des spirales de grande conception et galaxies barrées dans le HDF-N et utiliser des images artificiellement décalées vers le rouge des galaxies proches pour démontrer que les déficiences sont probablement réelles.

La figure 46 montre plusieurs des différentes catégories de redshift intermédiaire et élevé. morphologies des galaxies, basées sur des images en bande V et i du GEMS et de Hubble UDF. Les redshifts vont de $0,42$ à $3,35$ et offrent une large gamme de temps d'analyse. D'abord, dans une telle plage, certaines galaxies semblent relativement normales, comme le montrent les courbes spirale et elliptique galaxies dans les deux cadres supérieurs gauches de la figure 46. La spirale $z=0,59$ est classifiable comme type

SA(s)bc et l'elliptique comme type E3. La spirale $z=0,99$ affichée dans le cadre du milieu à droite de la figure 46 a des touffes plus grandes, aucun objet central clair et plus d'asymétrie que le $z=0,59$ spirale, mais est toujours reconnaissable comme une spirale. Cependant, d'autres catégories moins familières sont trouvés. En général, les galaxies à fort redshift sont en moyenne plus petites que les galaxies proches. (par exemple, Elmegreen et al. 2007a=EEFM07).

Les « galaxies en chaînes » ont été identifiées pour la première fois par Cowie et al. (1995) et sont des structures linéaires avec des nœuds brillants superposés qui ont des tailles et des couleurs bleues similaires au type tardif normal galaxies et profils de luminosité des grands axes relativement plats. Ils ont la forme d'une tranche galaxies à disques mais dépourvues de renflements ou de noyaux clairs. Une étude récente d'Elmegreen, Elmegreen, & Sheets (2004=EES04) de morphologies de galaxies faibles (redshifts 0,5-2) dans le modèle Advanced Le champ de la galaxie « Tadpole » (UGC10214) de la Camera for Surveys (ACS) a montré que les galaxies en chaîne sont la morphologie linéaire la plus courante à des magnitudes inférieures à $I = 22$, ce qui représente pour plus de 40% de l'échantillon. Leur dominance (également constatée par Cowie et al. 1995) est interprété par EES04 comme un effet de sélection car les galaxies de bord relativement minces optiquement sont plus susceptibles d'être vues près de la limite en raison d'une luminosité de surface projetée plus élevée que pour les versions face à face des mêmes galaxies. EES04 suggère que les chaînes de galaxies sont des galaxies irrégulières de tranche qui évolueront vers des galaxies à disques de type tardif. Les chaînes sont les plus morphologie linéaire aplatie à faibles magnitudes.

Les « amas de touffes » (EES04) sont des collections quelque peu irrégulières de nœuds ou de touffes bleues. avec une très faible émission entre les touffes. Les touffes ont des tailles d'environ 500 pc et des masses de $\approx 108-109 M_{\odot}$. Les deux exemples illustrés à la figure 46 ont $z > 1$. Elmegreen, Elmegreen, & Hirst (2004=EEH04) ont identifié les clusters comme les homologues directs des clusters linéaires. galaxies en chaînes, basées sur les similitudes des propriétés des amas avec celles observées dans les galaxies en chaînes, et sur la distribution des rapports d'axes des systèmes par rapport à galaxies à disque normales. L'absence de touffe renflée est également cohérente avec cette conclusion.

Néanmoins, l'analyse des images NICMOS IR dans le HUDF a conduit Elmegreen et al. (2009a) pour conclure que 30 % des amas d'amas et 50 % des chaînes de galaxies montrent des signes de jeunes renflements, ce qui implique qu'au moins la moitié de ces galaxies pourraient être véritablement sans renflements. Dans une étude connexe, Elmegreen et al. (2009b) montrent que les meilleurs analogues locaux des amas sont des galaxies naines irrégulières comme Ho II, dont la masse est multipliée par 10 à 100. Cette étude a également attiré l'attention sur les amas d'amas avec des disques de fond rouge pâle, par opposition au bleu clusters qui ne disposent pas d'une telle fonctionnalité. Elmegreen et coll. soutiennent que le fond rouge les amas de touffes font partie d'une séquence évolutive partant des amas de touffes bleues aux spirales avec un renflement « classique » (par exemple, KK04). Les amas, formés par gravitation Les instabilités dans un disque turbulent sont importantes et peu nombreuses, et finiront donc par fusionnent près du centre de la galaxie s'ils survivent aux effets des explosions de supernova (par exemple, Elmegreen, Bournaud et Elmegreen 2008).

Les « têtards » (van den Bergh et al. 1996) sont des formes asymétriques « tête-queue ». morphologies avec un noyau brillant décentré et une queue, comme un têtard. Un local rare L'exemple est NGC 3991. Des têtards ont été reconnus dans 3% des galaxies de HDF-N et ont été trouvé de couleur très bleue. Habituellement, la tête et la queue sont bleues, mais van den Bergh et coll. (1996) montrent un exemple où la tête est rouge et la queue bleue. EEH04 ont montré que les têtards n'ont ni profils d'axes majeurs exponentiels ni renflements clairs, et en Dans leur échantillon d'objets linéaires, les têtards sont les moins fréquemment observés.

Les cadres inférieurs de la figure 46 montrent des chaînes et des anneaux courbés ou des anneaux partiels (Elmegreen & Elmegreen 2006=EE06). On pense que les anneaux et les anneaux partiels sont principalement dus à des collisions. dans la nature (c'est-à-dire, comme les galaxies annulaires conventionnelles illustrées à la figure 27) et montrent les différents morphologies attendues lorsque de petits compagnons plongent à travers une galaxie à disque plus grande dans de différentes manières (Appleton et Struck-Marcell 1996). Bien que les chaînes courbées ressemblent aux chaînes partielles anneaux, ils manquent de noyaux décalés et de toute preuve d'un fond, plus un disque face vers le haut. EE06

suggèrent que les chaînes courbées sont simplement des versions déformées des chaînes linéaires les plus courantes qui ont subi une interaction. Les âges des touffes de chaînes courbées sont plus jeunes que ceux trouvés dans les anneaux et les anneaux partiels, et EE06 soutiennent que les séparations relatives et les tailles des les amas indiquent qu'ils se forment par instabilités gravitationnelles.

Elmegreen et coll. (2005) montrent qu'environ 1/3 des vélos elliptiques catalogués dans les HUDF ont des touffes bleues proéminentes en leur centre (voir aussi Menanteau et al. 2001, 2004). Ils ont soutenu que ces amas impliquent probablement des événements d'accrétion basés sur une comparaison de leurs grandeurs et couleurs avec des objets de terrain locaux. Ménanteau et coll. (2001) ont pu reproduire les distributions de couleurs avec un modèle comportant une étoile superposée sur un population stellaire plus ancienne préexistante.

La morphologie des galaxies aux redshifts intermédiaires et élevés comprend également des interactions évidentes cas ainsi que les morphologies possibles de fusion. Ponts, queues de marée, panaches et même M51 les analogues sont vus comme dans les galaxies proches, mais sont à plus petite échelle que pour les objets proches (EEFM07). Le cadre du milieu de la rangée du bas montre une éventuelle fusion en cours de deux chaînes courbées (ou, alternativement, deux spirales en interaction), appelées « galaxie d'assemblage » par EEFM07 car ils semblent s'assembler à partir d'objets plus petits. EEH04 et EEFM07 discutons également des systèmes doubles, considérés comme une autre catégorie des systèmes linéaires. Le les systèmes doubles comme celui à $z = 3,35$ illustré à la figure 46 fusionnent probablement des elliptiques. EEFM07 décrit également des « galaxies de crevettes », qui semblent être des galaxies en interaction avec un un seul bras ou queue incurvée, s'enroulant à une extrémité pour former un « corps ».

D'autres études sur la morphologie des galaxies à fort redshift se sont concentrées sur le redshift spécifique plages sélectionnées par la technique de suppression des UV. Conselice et Arnold (2009) ont examiné les morphologies des galaxies dans la plage $z=4-6$ du HUDF et les mesures quantitatives des paramètres tels que les paramètres concentration-asymétrie-agglutination (formation d'étoiles) (CAS ; Conselice 2003) et d'autres paramètres connexes utiles pour distinguer

fusions de galaxies normales. Le système CAS est basé sur des paramètres globaux simples qui sont facilement dérivés automatiquement pour un grand nombre de galaxies. Conselice (2003) a égalisé le C paramètre à l'histoire évolutive passée des galaxies tandis que les paramètres A et S mesurent évolution plus active des fusions et de la formation d'étoiles. Conselice et Arnold ont découvert que la moitié des galaxies HUDF qu'ils ont étudiées présentent des asymétries significatives et pourraient être en cours de fusion, tandis que l'autre moitié est principalement constituée de systèmes symétriques lisses qui peuvent se sont rapidement effondrés dans un état temporaire et calme.

D'autres approches quantitatives de ces questions incluent l'indice Sersic n qui caractérise les profils de luminosité radiale (Ravindranath et al. 2006; Elmegreen et al. 2007b) et le coefficient de Gini (Abraham et al. 2003 ; Lotz et al. 2006). Le coefficient de Gini fournit un moyen de quantifier une morphologie à redshift élevé qui ne dépend pas de la galaxie forme ou l'existence d'un centre bien défini, et est bien adapté aux types d'objets illustré à la figure 46. Lotz et al. (2006) ont découvert dans un échantillon de 82 galaxies à rupture de Lyman que 10 à 25 % sont des fusions probables, 30 % sont des sphéroïdes relativement peu perturbés et le reste est disques, fusions mineures ou post-fusions.

Compte tenu de l'augmentation du nombre de galaxies de forme particulière et irrégulière avec un redshift croissant, le Une question se pose naturellement : quand la séquence de Hubble et tous les détails qui l'accompagnent ont-ils eu lieu ? tomber sur place? Cette question est étudiée par Conselice et al. (2004), qui quantitativement analysé un échantillon de redshift élevé bien défini à l'aide du système CAS. Conselice et coll. identifier les « objets diffus lumineux » (LDO) comme les galaxies ayant un C inférieur à 1σ en dessous de la moyenne, et les « objets asymétriques lumineux » (LAO) comme galaxies ayant $A > S$. Certains des deux les classes d'objets sont couvertes par Elmegreen et al. catégories décrites ci-dessus. La totalité de la Les LDO et les LAO ont un $MB < -19$, et Conselice et al. suggèrent que de tels objets pourraient être le précurseurs des galaxies modernes à disques et elliptiques. Ceux-ci se trouvent dans la plage de redshift $0,2 < z < 2$, ce qui suggère que la séquence actuelle de Hubble a commencé à prendre forme dans cet intervalle.

Conselice et coll. (2008) considèrent les morphologies des galaxies plus massives que $10^{10} M_{\odot}$ et dans la plage $1,2 < z < 3$. Pour une magnitude z_{850} de 27, la majorité de ces galaxies sont particulier. Ils concluent que ces galaxies subissent des fusions de $4,3 \pm 0,8$ jusqu'à $z = 3$.

14. Galaxies géantes à faible luminosité de surface

Les classes de luminosité de van den Bergh mettent en évidence la manière dont la luminosité et l'éclat des surfaces vont généralement ensemble. Une faible luminosité de surface signifie généralement une faible luminosité et une petite taille, d'où une classification naine. Cependant, la découverte d'un rare géant à faible luminosité de surface (GLSB) par Bothun et al. (1987) montre que la morphologie peut parfois être trompeur pour juger de la luminosité absolue. Les caractéristiques de ces objets sont relativement renflement normal et luminosité de surface extrêmement faible, disque très grand. Disque radial les longueurs d'échelle et les luminosités sont inhabituellement grandes et la surface centrale du disque est extrapolée les luminosités sont inhabituellement faibles, comparées à des spirales plus normales. Les disques ont tendance à être relativement lisse avec quelques grandes régions HII isolées. Bothun et coll. (1987) soulignent un modèle selon lequel les disques de ces galaxies ont une densité de surface de gaz si faible qu'ils sont en grande partie peu évolué, en raison de l'inefficacité de la formation d'étoiles.

Les galaxies GLSB peuvent être classées dans les galaxies Hubble-Sandage et de Vaucouleurs systèmes de classification bien que, comme l'ont noté McGaugh, Schombert et Bothun (1995), la majorité est classée après le stade Sc. Les renflements, les barres, les anneaux et les motifs en spirale sont évident dans certains exemples, malgré la faible luminosité de la surface du disque. La figure 47 montre trois des exemples GLSB initialement reconnus (McGaugh, Schombert et Bothun 1995) : Malin 2 (également connu sous le nom de F568–6), UGC 1230 et UGC 6614. Dans les images, la longueur d'un camp est respectivement de 131, 38 et 77 kpc. Ceux-ci peuvent être comparés au géant normal spirale NGC 7531 dans le cadre le plus à droite, où la longueur d'un côté est également de 38 kpc. Malin 2 et UGC 6614 sont des objets physiques particulièrement énormes. UGC 1230 est également très volumineux pour

une morphologie de type si tardif. van den Bergh (1998) compare la taille de Malin 2 au noyau d'un amas de galaxies. Il considère les « monstres » comme Malin 1 et Malin 2 comme n'en faisant qu'un de trois types de galaxies LSB. Certaines galaxies LSB sont aussi grandes que des galaxies normales, comme UGC 1230. La plupart des galaxies LSB, cependant, sont naines : elliptiques, irrégulières et, moins fréquemment, spirales. Ceux-ci sont décrits plus en détail dans la section 15.2.

Un exemple d'un autre objet qui pourrait être considéré comme une grande galaxie LSB, mais qui manque de renflement ou de formation d'étoiles récente évidente, est SGC 2311.8–4353, le mystérieux compagnon fantomatique près de la droite de NGC 7531 sur la figure 47. Cet objet particulier est 2/3 de la taille de NGC 7531 (Buta 1987) mais avec un redshift inconnu. S'il est associé à NGC 7531, son diamètre pourrait atteindre 30 kpc à l'isophote détectable le plus faible niveau et ne serait clairement pas un nain.

Une étude récente de trois GLSB (Malin 1, UGC 6614 et UGC 9024) par Rahman et Al. (2007) ont montré que l'émission IR de ces objets est cohérente avec leur déterminé de faibles taux de formation d'étoiles, les disques optiques diffus n'étant pas détectés depuis deux des trois. Une étude dynamique de deux GLSB (Malin 1 et NGC 7589) par Lelli, Fraternali et Sancisi (2010) ont amené les auteurs à conclure qu'au moins dans ces cas, La galaxie GLSB peut être considérée comme une galaxie interne à haute luminosité de surface ayant une disque LSB étendu. Ceci est basé sur les courbes de rotation en forte hausse trouvées pour ces galaxies, ce qui ressemble beaucoup à ce que l'on observe dans les premières galaxies à haute luminosité de surface.

Impey & Bothun (1997) soutiennent que les galaxies LSB plus brillantes que $M_B = -14$ contribuent de manière significative à la densité de luminosité de l'univers local, sont dominés par la matière noire à presque tous les rayons, et ont une histoire évolutive impliquant un effondrement tardif de faible amplitude perturbation, un faible taux de formation d'étoiles et des changements très lents. Les grands LSB sont grandement sous-représentés dans les catalogues de galaxies mais constituent clairement une classe d'objets importante.

15. Morphologie de la galaxie en couleur

15.1. Galaxies normales

Le Sloan Digital Sky Survey (York et al. 2000 ; Gunn et al. 1998) fournit le plus grand ensemble d'informations sur les couleurs des galaxies. L'imagerie multi-longueurs d'onde dans les filtres Ugriz a permis la production d'images couleur de haute qualité pour des milliers de galaxies. Bien que les systèmes de classification Hubble-Sandage-de Vaucouleurs étaient basés sur des images en lumière bleue seul, il est encore possible de classer de manière fiable les galaxies avec des images couleur SDSS, qui sont basées sur des images gri combinées (Lupton et al. 2004). Sur de telles images, on peut voir directement les différences de population stellaire qui caractérisent différents types de galaxies.

La figure 48 montre la séquence de couleurs de Hubble de E à Sm. Autrefois, les couleurs des galaxies étaient systématiquement mesurées par photométrie photoélectrique (de Vaucouleurs, de Vaucouleurs, & Corwin 1976), il a été noté que les couleurs intégrées varient progressivement avec l'avancée le long de la séquence Hubble. Les dernières étapes ont corrigé l'indice de couleur total $(B - V) \pm 0,3-0,4$ tandis que les galaxies E et S0 ont $(B - V) \pm 0,9-1,0$ (par exemple, Buta et al. 1994). Ces dernières couleurs correspondent au jaune-orange tandis que les premières sont blanc bleuâtre. Les couleurs commencent à changer à S0/a et Sa et deviennent progressivement plus bleues. La figure 48 montre la raison pour le changement. Les galaxies antérieures à Sa sont dominées par de vieilles étoiles ayant les couleurs de K géants. À mesure que le stade avance de Sa à Sm, la structure en spirale devient progressivement plus importante par rapport au renflement. Puisque les bras sont dominés par des complexes de massifs jeunes étoiles, cela rend les couleurs intégrées des galaxies progressivement plus bleues jusqu'à ce qu'à la fin de la séquence, les couleurs plus bleues de ces étoiles aient surmonté les couleurs jaunâtres de la lumière de l'arrière-plan des anciennes étoiles du disque. La figure 48 montre également que les couleurs intermédiaires de types intermédiaires tels que Sb et Sc sont dues aux couleurs jaunâtre-orange des renflements et des barres combinées aux couleurs plus bleues des bras en spirale.

L'analyse des couleurs de galaxies SDSS intégrées pour plus de 100 000 galaxies a conduit à l'un des résultats les plus spectaculaires de l'enquête : une bimodalité claire dans la distribution de couleur en corrélation avec la morphologie : un pic rouge qui comprend principalement E, S0 et Sa galaxies, et un pic bleu qui comprend principalement les galaxies Sb, Sc et Irr (Strateva et al. 2001). Bien que la corrélation entre la couleur et les types des galaxies soit connue depuis longtemps à partir de mesures photoélectriques (par exemple de Vaucouleurs 1961 ; Buta et al. 1994), le grand L'échantillon fourni par SDSS a permis de démontrer la bimodalité à un haut degré d'importance. Dans les tracés de l'indice de couleur $u - r$ par rapport à la magnitude absolue M_r , l'échelle galactique équivalent d'un diagramme HR stellaire, les galaxies proches de type précoce suivent une bande étroite appelée la séquence rouge, tandis que les galaxies voisines de type plus récent, principalement en formation d'étoiles, apparaissent comme un large séquence bleue (également parfois appelée « nuage bleu »). Baldry et coll. (2004) ont montré que la bimodalité (sous la forme d'une double distribution de nombres gaussiens sur tous les types) est détectable de $M_r \approx -15,5$ à $M_r \approx -23$, n'étant indétectable que pour les plus lumineux galaxies. Wyder et coll. (2007) ont montré que l'utilisation des magnitudes GALEX proches de l'ultraviolet et les magnitudes optiques de la bande R offrent une discrimination encore plus grande entre les valeurs gaussiennes Composants. Bell et coll. (2004) ont montré que la bimodalité est détectable dans les galaxies faibles à $z \approx 1$, indiquant que cette caractéristique de la population galactique s'étend à une analyse rétrospective temps d'au moins 9Gyr. On pense que les galaxies évoluent de la séquence bleue vers la séquence rouge. séquence à mesure que leur formation d'étoiles est stoppée, peut-être par des fusions, un épuisement des gaz ou Commentaires de l'AGN (par exemple, Martin et al. 2007). La possibilité d'évolution a engendré de grandes intérêt pour les galaxies situées près du minimum de la distribution bimodale (ce qu'on appelle « vallée verte » ; Thilker et coll. 2010 et les références qui y figurent).

15.2. Galaxies naines

Pratiquement toutes les galaxies représentées sur la figure 48 ont une luminosité relativement élevée, avec magnitudes bleues absolues M_B en moyenne environ -20. Lorsque des paramètres physiques tels que M_B sont considérés, il apparaît clairement que la forme particulière de la classification de Vaucouleurs

Le volume présenté dans la figure 3 ne fait que mettre en évidence la diversité morphologique des familles et variétés à chaque étape, mais ne nous renseigne pas sur l'espace des paramètres physiques à chaque étape, qui s'étend considérablement à chaque fin du volume (McGaugh, Schombert et Bothun 1995). La plupart des galaxies naines connues sont de type précoce ou tardif, mais pas intermédiaires.

15.2.1. Galaxies dE, dS0, BCD et cE

L'étude la plus approfondie sur la morphologie des galaxies naines a été réalisée par Binggeli, Sandage et Tammann (1985=BST), qui ont utilisé des photographies profondes pour sonder la dépression population de luminosité de l'amas de la Vierge, utilisant principalement la morphologie pour déduire l'amas adhésion. Des exemples de plusieurs catégories de galaxies naines de l'amas de la Vierge sont présentés dans la figure 49 en utilisant des images couleur SDSS et les classifications de BST. Le plus courant Le type est le type elliptique nain, ou type dE, qui représente 80 % des galaxies de la BST.

catalogue. Les galaxies dE vont de $M_B = -18$ à -8 (Ferguson & Binggeli 1994). Beaucoup Les dE ont un noyau non résolu, en forme d'étoile, dont la présence est indiquée par un N attaché à le type, comme dans dE0,N. Les panneaux supérieurs droits de la figure 49 montrent trois exemples assez typiques. La luminosité de la surface plus grande et plus faible est peut-être liée à ces systèmes dE normaux.

elliptiques (« grand dE ») illustrés dans les deux cadres inférieurs droits de la figure 49.

La deuxième rangée de la figure 49 montre des exemples de la classe intéressante de nain S0. galaxies. Tous les exemples présentés se distinguent des dE en montrant une structure lisse mais avec des fonctionnalités supplémentaires comme un objectif ou une barre faible. Les galaxies dS0 peuvent également être nucléées

et sont appelés dS0,N. En plus de la faible luminosité de surface dEs et dS0s, la Vierge

Le cluster comprend deux classes de naines à haute luminosité de surface. La catégorie CE fait référence à des vélos elliptiques compacts qui ressemblent au M32.

Les galaxies naines compactes bleues (BCD) constituent une classe spéciale de naines formatrices d'étoiles. irréguliers caractérisés par quelques nœuds brillants incrustés dans un fond stellaire de faible luminosité de la surface (Sandage et Binggeli 1984). Les cas les plus extrêmes sont presque stellaire (Thuan & Martin 1981). Les nœuds sont souvent des amas de super étoiles associés à Régions HII de type 30-Doradus, et le fond pâle peut être très bleu (Thuan et al. 1997). Spectroscopiquement, les BCD ont des raies d'émission étroites superposées sur un continuum bleu, et les lignes indiquent une faible métallicité. La figure 49 montre trois exemples du BST Virgo Catalogue de grappes. Gil de Paz et coll. (2003) présentent un atlas de plus de 100 BCD qui mettre en valeur leur structure.

Comme décrit dans la section 5.1, les galaxies dE représentées sur la figure 49 ne sont pas les galaxies les plus basses. extension de luminosité d'elliptiques plus lumineux. Ceux-ci, avec la classe dS0, sont appelées galaxies « sphéroïdales » par Kormendy et al. (2009 ; voir figure 6), qui ont confirmé découverte de Kormendy (1985) selon laquelle ces galaxies sont davantage liées à une faible luminosité évoluée spirales et irrégulières qu'aux véritables elliptiques. Basé sur des corrélations de valeurs bien définies paramètres photométriques (par exemple, luminosité de la surface centrale ou dispersion de vitesse par rapport au noyau) rayon ou magnitude absolue), ces auteurs associent les elliptiques comme M32 au niveau bas réel fin de luminosité de la séquence de galaxies E (voir aussi Wirth & Gallagher 1984). Ainsi, le cE Les galaxies représentées sur la figure 49 sont en un sens de véritables « elliptiques naines » que les galaxies dE. montré. Cela n'enlève rien à la valeur des classifications BST, puisqu'elles sont purement interprétations morphologiques.

15.2.2. Sphéroïdaux et irréguliers nains de groupe local

Les galaxies de luminosité la plus faible que nous pouvons étudier en détail se trouvent dans le groupe local. Heureusement, quelques-uns se trouvent dans la zone couverte par le SDSS afin qu'ils puissent être illustrés dans couleur. Ces objets, tous plus faibles que $M_V = -12$, sont représentés sur la figure 50. Lion I et Lion II sont généralement appelées galaxies sphéroïdales naines, ou dSph (par exemple, Ferguson & Binggeli 1994). Les galaxies dSph ont tendance à avoir des magnitudes visuelles absolues $M_V > -15$ et un faible degré d'aplatissement; On pense qu'il s'agit du type de galaxie le plus abondant dans l'Univers. Leo I ($M_V = -11,9$) et Lion II ($M_V = -9,6$) semblent différents en partie à cause de leur étoile différente histoires de formation. Les galaxies dSph et naines irrégulières (dI) sont maintenant connues pour avoir des histoires complexes et des histoires variées de formation d'étoiles qui peuvent impliquer plusieurs épisodes de formation d'étoiles et les effets des interactions (Mateo 1998 et références qui y figurent). Les deux autres galaxies sur la figure 50, Leo A et DDO 155 sont des irréguliers nains ayant $M_V \approx -11,5$. Un détaillé L'étude HST du contenu stellaire de Léon A (Cole et al. 2007) a montré que 90 % de l'étoile la formation dans la galaxie s'est produite il y a moins de 8 Gyr, avec un pic il y a 1,5 à 3 Gyr. UN Un résumé utile des propriétés des galaxies dSph est fourni par van den Bergh (1998) et, plus récemment, par Tolstoï, Hill et Tosi (2009), qui discutent également de l'histoire de la formation des étoiles des galaxies du groupe local dI.

Le SDSS a facilité la découverte de nombreuses nouvelles galaxies naines du groupe local (Belokurov et al. 2007). Par exemple, le SDSS a conduit à la découverte de l'un des plus faibles galaxies dSph connues, une nouvelle naine dans la Grande Ourse (appelée UMa dSph) ayant $M_V \approx -7$ (Willman et coll. 2007). Le plus intéressant est Leo T, qui est une galaxie $M_V = -7,1$ dSph avec une formation d'étoiles récente, fournissant l'une des illustrations les plus dramatiques du lien entre les galaxies dSph et dI, et la galaxie la moins lumineuse connue pour avoir une étoile récente formation (Irwin et al. 2007).

15.2.3. Spirales naines

Sandage & Binggeli (1984) ont décrit la classification des galaxies naines basée sur la Virgo Cluster, et a conclu qu'il n'y a « pas de véritables spirales naines ». Il s'agit principalement de spirales naines qui pourraient être classées dans les types Sa, Sb ou Sc, c'est-à-dire ayant à la fois un renflement et un disque. Des spirales naines de type tardif sont déjà intégrées dans le Hubble modifié de de Vaucouleurs Séquence en tant que types Sd-Sm et connexion directe aux irréguliers de Magellan, comme le montre la figure 1 de Sandage & Binggeli (1984). Ainsi, tout exemple authentique de spirales naines Sa, Sb ou Sc serait d'un grand intérêt car ils remettraient en question l'idée selon laquelle pour qu'une galaxie puisse pour fabriquer des bras spiraux bien définis, il faudrait qu'il soit plus massif qu'une certaine limite inférieure (estimé à $5 \times 10^9 M_\odot$ par Sandage & Binggeli).

Quatre des meilleurs cas de véritables spirales naines sont illustrés à la figure 51. Les deux les cadres les plus à droite montrent IC 783 (type BST dS0,N) et IC 3328 (type BST dE1,N), tous deux Membres du cluster Vierge ayant des magnitudes absolues $M_B \approx -16$ à -17 , et trouvé ont une structure en spirale subtile par Barazza, Binggeli et Jerjen (2002) et Jerjen, Kalnajs et Binggeli (2000), respectivement. Les motifs sont difficiles à voir sur les images couleur SDSS directes illustré à la figure 51, mais ces auteurs utilisent des modèles photométriques, la décomposition de Fourier et masquage flou pour vérifier la réalité des motifs. Barazza et coll. conclure que bon nombre de les nains brillants des premiers types du groupe de la Vierge ont des disques. Un exemple avec un bar et les bras spiraux sont NGC 4431 (représenté par dS0 sur la figure 49).

Le panneau le plus à gauche de la figure 51 montre une image HST à large bande V (Carollo et al. 1997). de NGC 3928, une magnitude absolue $M_B = -18$ galaxie qui, à petite échelle, surexposée les images ressemblent à un E0, mais qui abrite un miniature (diamètre 2kpc), à faible luminosité Spirale Sb (van den Bergh 1980b). Basé sur une analyse spectroscopique, Taniguchi & Watanabe (1987) ont suggéré que NGC 3928 est une galaxie sphéroïdale qui a connu une accrétion événement qui a fourni le gaz nécessaire à la formation des étoiles dans le disque miniature.

Schombert et coll. (1995) ont attiré l'attention sur d'éventuelles spirales de champ nain. Un de leurs exemples, D563–4, est montré dans le deuxième cadre en partant de la gauche sur la Figure 51. Cette galaxie a $M_B \approx -17$. Quelques autres exemples sont donnés dans l'article, et Schombert et al. Trouve ça ce ne sont pas en général des spirales de grande conception, sont physiquement petites et ont de faibles masses HI. Cependant, van den Bergh (1998) considère tous les exemples de Schombert et al. spirales plutôt que de véritables spirales naines. Une possible véritable spirale naine donnée par van den Bergh est DDO 122 (type SV).

15.3. Projet Zoo Galactique

Le projet Galaxy Zoo (Lintott et al. 2008) a largement utilisé la couleur SDSS images. Le projet utilise un site Web pour solliciter l'aide de scientifiques citoyens du monde entier pour classer un million de galaxies et noter des cas intéressants et inhabituels dans divers forums fils. Avec une base de données aussi volumineuse sur laquelle travailler et un potentiel de découverte Réel, le projet a attiré de nombreux morphologues galactiques amateurs compétents. Un tel découverte était une nouvelle classe de galaxies appelées « pois verts », qui sont des objets ressemblant à des étoiles qui apparaissent en vert dans les images couleur composites SDSS (Figure 52, à gauche). Cardémone et coll. (2009) a utilisé des données SDSS auxiliaires pour montrer que les pois sont des galaxies vertes en raison d'une haute largeur équivalente à l'émission [OIII] 5007. Elles sont suffisamment distinctes des galaxies normales et quasars dans un tracé bicolore $g - r$ vs. $r - i$ qu'un tel tracé peut être utilisé pour identifier plus exemples. D'autres caractéristiques notées sont que les pois sont rares, ne dépassant pas 5 kpc de rayon, se trouvent dans des environnements de densité inférieure à celle des galaxies normales, mais peuvent toujours avoir des caractéristiques morphologiques. caractéristiques entraînées par les fusions, sont relativement faibles en masse et en métallicité, et ont une forte taux de formation d'étoiles. Cardémone et coll. conclure que les pois constituent une classe distincte de galaxies qui partagent certaines propriétés avec les galaxies compactes bleues lumineuses et les hautes luminosités UV galaxies à redshift.

Un autre objet coloré important de taille galactique identifié par Galaxy Zoo est "Hanny's Voorwerp" (Figure 52), une collection particulière de touffes bleues juste au sud de IC 2497. Lintott et coll. (2009) ont constaté que le gaz Voorwerp est principalement constitué de gaz ionisé, et après avoir exclu certains sources possibles de rayonnements ionisants, a conclu que l'objet pourrait être le premier identifié cas d'un écho lumineux quasar. L'implication est que la galaxie compagne a subi une phase quasar temporaire.

Maîtres et coll. (2010) examinent les propriétés des galaxies spirales de type tardif dont les couleurs sont beaucoup plus rouges que d'habitude (Figure 52, panneaux de droite), ce qui suggère qu'elles sont objets passifs où la formation d'étoiles a largement cessé ou est inférieure à la normale. Ces Les auteurs ont montré que les spirales rouges ne sont pas excessivement poussiéreuses et ont tendance à être proches du niveau élevé. extrémité du spectre de masse. Une gamme de densités environnementales a été trouvée, ce qui implique que l'environnement à lui seul ne suffit pas à rendre une spirale rouge. Une fraction de barre nettement plus élevée a été trouvée pour les spirales rouges par rapport aux spirales bleues, ce que Masters et al. suggérer pourrait Cela signifie que les barres elles-mêmes pourraient avoir agi pour arrêter la formation d'étoiles dans ces galaxies.

Un aspect philosophique majeur de Galaxy Zoo est la valeur de l'interprétation visuelle humaine. de la morphologie des galaxies. Autrement dit, l'œil humain peut intégrer davantage les détails d'une image. de manière fiable qu'un programme informatique, malgré la capacité de ce dernier à classer les nombres de galaxies bien au-delà de la capacité d'un seul individu. Cette philosophie a été utilisée pour compiler un catalogue majeur de paires de fusion de galaxies décrit par Darg et al. (2010). Dans Lors de la configuration initiale de Galaxy Zoo, un seul bouton permettait à un classificateur de sélectionner si un L'objet était une « fusion » fondée simplement sur l'apparition de particularités. Pour chaque galaxie, un nombre moyen pondéré, f_m , a été calculé pour caractériser la fraction des classificateurs qui interprété une paire de galaxies comme une fusion, essentiellement « morphologie par vote » et en quelque sorte rappelle le RC3 où les types morphologiques étaient dans de nombreux cas basés sur une échelle pondérée. moyenne d'un petit nombre de classificateurs (Buta et al. 1994). En prenant $f_m > 0,4$, Darg et al.

(2004) ont identifié 3003 paires et groupes de galaxies en fusion et ont également montré que la spirale Le rapport galaxie-elliptique dans les paires de fusion est deux fois plus élevé que pour la galaxie globale. population, ce qui suggère que les fusions impliquant des spirales sont détectables pendant une période plus longue que ceux qui n'impliquent pas de spirales.

Une philosophie similaire à celle de Galaxy Zoo a été utilisée par Buta (1995) pour compiler le Catalogue des galaxies aux anneaux du sud, ainsi que par Schawinski et al. (2007), qui ont classé visuellement 48 023 galaxies SDSS pour identifier un échantillon de taille significative de galaxies de type précoce pour un étude du lien entre l'activité nucléaire et la formation d'étoiles. Dans cette dernière étude, il a été avancé que l'interprétation visuelle était nécessaire pour éviter les préjugés contre les espèces précoces en formation d'étoiles. galaxies qui seraient exclues des échantillons sélectionnés par couleur. Un résultat majeur de cela L'étude était l'identification d'une séquence temporelle par laquelle une galaxie de type précoce a son étoile formation supprimée par l'activité nucléaire, une manifestation de la rétroaction AGN.

15.4. Galaxies isolées

Si les interactions et les fusions peuvent avoir des effets profonds sur la morphologie des galaxies, alors le la morphologie des galaxies isolées présente clairement un grand intérêt. De telles galaxies nous permettent de voir comment l'évolution interne seule affecte la morphologie, c'est-à-dire ce à quoi ressemblent les morphologies purement « naturelles » comme. Karachentseva (1973) a compilé un vaste catalogue (le Catalogue des galaxies isolées, ou CIG) de 1050 galaxies isolées qui s'est avéré très utile pour étudier cette problématique. UN Il est suggéré d'isoler une galaxie de diamètre D si elle n'a pas de compagnons de taille comparable de diamètre d compris entre $D/4$ et $4D$ sur une distance de $20d$. Verdes-Monténégro et al. (2005) montrent que cela signifie qu'une galaxie isolée de 25 kpc de diamètre, en présence de une vitesse typique d'une galaxie de champ de 150 km s^{-1} , n'a pas été visité par une masse comparable compagnon au cours des 3 dernières années. Ces auteurs discutent des limites du CIG (par exemple, les critères d'isolement ne fonctionnent pas toujours), mais en général c'est la meilleure source d'isolement

galaxies disponibles.

Sulentic et coll. (2006) ont examiné les 1050 galaxies CIG sur les cartes d'étude du ciel Palomar II en afin d'affiner l'échantillon et ont découvert que les galaxies isolées couvrent tous les types de Hubble. Parmi ceux-ci, 14 % étaient de type E/S0, tandis que 63 % étaient de type Sb-Sc, avec une population en spirale. plus lumineuse que la population E/S0. Sur la gamme de types Sa-Sd, la proportion augmente à 82%. Ainsi, un échantillon de galaxie isolé est très riche en spirales. Néanmoins, la présence de les galaxies de type précoce dans l'échantillon impliquent qu'il est peu probable qu'elles soient formées « par voie naturelle », car ces galaxies pourraient se trouver dans des environnements plus denses. Le raffinement des exemples de formulaires du CIG la base du projet Analyse du milieu interstellaire des galaxies isolées (AMIGA) (Verdes-Monténégro et al. 2005).

La figure 53 montre six exemples de galaxies Sb-Sc isolées de l'échantillon AMIGA, basé sur des images couleur SDSS. Tout cela semble relativement normal, mais il est intéressant de voir comment les galaxies non barrées comme NGC 2649 et 5622 (cadres supérieurs gauches de la figure 53) montrent de tels spirales globales remarquables, ce qui soutient que les spirales de ces galaxies n'ont pas été excité par une interaction.

Durbala et coll. (2008) ont analysé les propriétés photométriques de 100 Sb-Sc isolés AMIGA, et a découvert qu'une majorité d'entre elles présentaient des pseudo-renflements plutôt que des renflements classiques. En comparant les propriétés de galaxies isolées avec un échantillon de galaxies Sb-Sc sélectionnées sans critère d'isolement, Durbala et al. découvert que les spirales isolées ont des barres plus longues et, en utilisant les paramètres CAS, également moins d'asymétrie, de concentration centrale et d'agglutinations,

Durbala et coll. (2009) ont analysé les propriétés de Fourier du même ensemble de 100 éléments isolés spirales et longueurs et résistances estimées des barres. Des types antérieurs dans l'échantillon ont été trouvés avoir des barres de contraste plus longues et plus élevées que les types ultérieurs. Les multiplicités des bras spiraux étaient étudié également, et il a été montré que les cas ayant un modèle interne $m = 2$ et un modèle externe Le modèle $m = 3$ s'est produit dans 28 % de l'échantillon. Elmegreen, Elmegreen et Monténégro (1992)

a soutenu que dans de telles morphologies, le modèle $m=3$ est piloté en interne par le modèle $m=2$, et que les modèles à trois bras mesurent le temps écoulé depuis une interaction.

15.5. Imagerie couleur en champ profond

Les différentes galaxies profondes sont particulièrement intéressantes dans le domaine de la morphologie des galaxies colorées. des enquêtes de terrain qui ont été au cœur des études à fort redshift. Le plus récent est le Données de la HST Wide Field Camera 3 Early Release Science (ERS) (Windhorst et al. 2010), qui fournit des images panchromatiques très profondes basées sur 10 filtres allant de $0,2\mu\text{m}$ à $2\mu\text{m}$ de longueur d'onde. La figure 54 montre trois sous-sections du champ ERS principal, qui coïncide avec le champ GOODS sud (Giavalisco et al. 2004). Les galaxies observées s'étendent en redshift de $z=0,08$ à au moins $z=3$. Windhorst et coll. (2010) soutiennent que des images comme le champ ERS est suffisamment profond pour permettre de sonder l'évolution des galaxies dans le redshift crucial $z\approx 1-3$ où les galaxies se sont assemblées dans leurs formes massives. Par $z\approx 1$, le Hubble la séquence était largement en place. La figure 54 montre une variété de lieux intéressants à proximité ainsi que morphologies à z élevé, y compris certaines de celles illustrées dans la figure 46. Images comme l'ERS ce champ nous permet de connecter les populations de galaxies locales et lointaines avec des détails sans précédent.

16. Classification automatisée des galaxies à grande échelle

Le processus de classification des galaxies décrit jusqu'à présent est un exercice manuel dans lequel un l'observateur tente de trier une galaxie selon son stade, sa famille, sa variété et son anneau extérieur appropriés classification, etc., par inspection visuelle uniquement. Pour un petit nombre d'observateurs, cela a été réalisée pour pas moins de 14 000 galaxies par Nair & Abraham (2010) et 48 000 galaxies par Schawinski et coll. (2007), alors que pour un grand nombre d'observateurs travaillant de concert (par exemple, le Projet Galaxy Zoo), cela a été réalisé pour un million de galaxies. Mais essentiel à de telles entreprises

est la préparation des images pour la classification et le besoin d'une approche homogène et objective. approche d'un très grand nombre de galaxies. Cela a conduit à une application étendue de méthodes automatisées de classification des galaxies. Par exemple, Nair & Abraham (2010) visuellement a classé les galaxies dans des compartiments codés dans le but de former une classification automatique algorithme.

(Le reste de cette partie se trouve dans la publication imprimée.)

17. Le statut et l'avenir des études morphologiques

Le grand nombre d'illustrations de cet article atteste de la richesse de la diversité des morphologie des galaxies. Il n'est bien entendu pas possible d'illustrer tous les aspects de la morphologie qui Cela vaut peut-être la peine d'en discuter, mais le plus intéressant est de savoir dans quelle mesure la morphologie physique des galaxies a évolué. cela fait 35 ans qu'Allan Sandage a écrit sa revue de la morphologie des galaxies dans Volume IX des étoiles et des systèmes stellaires. La morphologie des galaxies n'est plus purement descriptive le sujet qu'il était autrefois.

Les perturbations internes telles que les barres sont apparemment capables de générer beaucoup de la structure intéressante que nous voyons dans les galaxies à disques, et des aspects plus théoriques et observationnels des études devraient élucider cela davantage. L'impact des barres sur la morphologie semble bien compris, comme le résume en détail KK04 dans son article de synthèse monumental sur pseudobulges. Les barres redistribuent le moment cinétique et réorganisent les nuages de gaz pour qu'ils s'écoulent dans régions de résonance et formation d'étoiles combustibles. Le rassemblement de gaz dans des régions de résonance peut conduire à la formation d'anneaux, et peut en effet également augmenter la concentration de masse centrale pour le point de destruction du bar. Même à défaut, l'accumulation de gaz dans la région nucléaire peut conduire à la formation d'un pseudobulge. La richesse de la morphologie des galaxies barrées en témoigne au rôle important que joue l'évolution séculaire dans la structuration des galaxies.

Progrès dans la compréhension du rôle des fusions et des interactions sur la morphologie des galaxies a également progressé à un rythme rapide. Grande réussite en simulations numériques et en théorie de galaxies en interaction a permis de lier un type spécifique d'interaction à un type spécifique morphologie (par exemple, galaxies annulaires collisionnelles). La structure complexe des galaxies de type précoce, avec des formes isophotes carrées et discales, des coquilles et des ondulations, ainsi que d'autres caractéristiques, montre que les interactions et les fusions jouent un rôle important dans le modelage des galaxies (voir l'excellent revue par Schweizer 1998). Avec l'avènement du télescope spatial Hubble, ce rôle s'est accru. été élucidée d'autant plus clairement que le taux de fusion était plus élevé dans le passé.

Malgré les progrès théoriques, il est intéressant de noter que la morphologie classique n'a pas encore évolué. perdu sa pertinence ou son utilité même après plus de 80 ans depuis que Hubble a publié son célèbre article de 1926. Peu importe les progrès réalisés dans la compréhension de la base physique de la morphologie est faite, il reste encore besoin de l'ordre et des idées fournies par les modèles classiques. Classifications des galaxies Hubble-Sandage-de Vaucouleurs. La morphologie a connu un creux phase dans les années 1980 et 1990, où l'on a perçu que la classification des galaxies l'accent était mis sur des détails sans importance et était trop descriptif pour être utile. On pensait que la classification de Hubble était allée aussi loin qu'elle pouvait aller, et qu'une autre approche Il fallait essayer de construire une image plus physique des galaxies. A cette époque, il y avait le sentiment que l'accent devrait être davantage mis sur les « éléments constitutifs » des galaxies, ou ce qu'on pourrait appeler des sous-systèmes galactiques (par exemple, Djorgovski 1992). Quantification de la morphologie est devenue plus possible à mesure que l'instrumentation avancée permettait des mesures physiques à effectuer. En fin de compte, à mesure que la morphologie devenait mieux comprise, il est également devenu clair ce que pouvait réellement signifier un type tel que «(R)SB(r)ab», ce qui a amélioré la valeur de classification (KK04). De plus, les simulations numériques sont devenues sophistiquées suffisamment pour faire des prédictions sur la morphologie (par exemple, les sous-classes R1 et R2 des cellules externes). anneaux et pseudo-anneaux). Ce genre de choses, ainsi que le mouvement de la morphologie du domaine photographique au domaine de l'imagerie numérique, l'élargissement du

couverture de longueur d'onde disponible pour les études morphologiques de l'optique à l'ultraviolet et infrarouges, le Sloan Digital Sky Survey et l'accessibilité du redshift élevé galaxies à une étude morphologique détaillée sans précédent, tous ont joué un rôle dans l'apport la morphologie des galaxies à l'avant-garde de la recherche extragalactique.

Néanmoins, la rédaction de cet article a montré que de nombreuses galaxies et classes importantes des galaxies n'ont pas été suffisamment étudiées pour disposer de nombreuses données modernes. Pour Par exemple, malgré l'intérêt considérable porté aux galaxies à anneaux collisionnels au cours des 20 dernières années ou ainsi, Struck (2010) a été contraint de déplorer que les galaxies en anneau « soient sous-observées ». Le même peut être dit pour les galaxies à anneaux de résonance, les galaxies géantes à faible luminosité de surface, les spirales naines, Spirales barrées de Magellan, spirales à contre-enroulement et autres classes de galaxies en interaction. Tout ce que l'on peut dire à ce sujet, c'est que d'autres études seront probablement menées, surtout si l'instrumentation facilite les objets en question. La rotation et la dynamique sont loin d'être à la hauteur photométrie pour la plupart des classes de galaxies, mais ajouterait beaucoup d'informations si cela était possible.

À l'autre extrême, les galaxies de type précoce (galaxies E et S0) continuent de faire l'objet de recherches approfondies. grands projets de recherche photométriques, cinématiques et théoriques. Des indices importants sur la formation et l'évolution de telles galaxies sont contenues dans leurs formes intrinsèques (oblate, prolate, triaxial), dans les âges, les métallicités et les rapports radiaux masse/lumière de leurs étoiles populations, dans leur structure orbitale tridimensionnelle et dans les particularités cinématiques on les trouve souvent dans de tels systèmes (de Zeeuw et al. 2002). Parmi les études les plus récentes figurent analyse photométrique massive des premiers types du cluster de la Vierge par Kormendy et al. (2009), et le projet ATLAS3D décrit par Cappellari et al. (2011). ATLAS3D est le plus grand base de données cinématique d'informations de champ de vitesse bidimensionnelle de haute qualité jamais obtenues pour les galaxies de type précoce, dont 260 de ces galaxies dans un échantillon bien défini et complet. Cette enquête n'est que la dernière partie d'un effort à long terme mené par de nombreux chercheurs, commençant dans les années 1980, pour comprendre les premiers types de galaxies en termes de paramètres quantitatifs pouvant

être liés à des modèles théoriques. Les premiers types ont été une énigme persistante en matière morphologique.

études, et des preuves considérables suggèrent que la séquence E, S0 telle que définie par Hubble,

Sandage, et de Vaucouleurs cache une grande partie de la physique importante associée à ces

objets. Le projet ATLAS3D a été conçu pour exploiter le paramètre λR décrit par

Emsellem et coll. (2007 ; voir section 5.1), qui sépare les types précoces en types rapides et lents.

rotateurs et discrimine les galaxies le long de la séquence de couleurs rouge (section 15.1).

Ces progrès pour les galaxies de type précoce ne signifient pas que les analyses quantitatives de
les galaxies de type ultérieur font défaut. Comme codes pour la décomposition photométrique bidimensionnelle
devenir de plus en plus sophistiquées (par exemple, Peng et al. 2010 ; Laurikainen et al. 2010 et
références qui y sont), paramètres qui caractérisent les renflements, les disques, les barres, les lentilles, les anneaux et
des modèles en spirale sont dérivés pour un grand nombre de galaxies (en particulier les galaxies barrées)
qui n'étaient pas décomposables de manière fiable avec les approches unidimensionnelles antérieures.

Pour l'avenir, il faut espérer que le Sloan Digital Sky Survey soit étendu
couvrir l'ensemble du ciel, et donner accès à des études morphologiques de haute qualité de plusieurs
millions de galaxies supplémentaires, dont certaines pourraient avoir des structures nouvelles et exotiques. Le James
Le télescope spatial Webb devrait être capable de porter le flambeau du HST à de plus grandes profondeurs et
résolutions des galaxies à redshift élevé, pour améliorer encore notre compréhension des galaxies
évolution.

Cet article est dédié à Allan Sandage (1926-2010), l'un des artistes du XXe siècle.
plus grands astronomes, qui ont contribué à préparer le terrain pour que la morphologie des galaxies soit l'une des
domaines les plus actifs de la recherche extragalactique moderne. Ce sont les efforts du Dr Sandage qui ont fermement
a cimenté les idées de Hubble sur la morphologie dans l'astronomie. L'auteur remercie le Dr.
Sandage pour l'inspiration qu'il a fournie pour cet article et pour son standard d'excellence dans
astronomie.

L'auteur remercie également sincèrement les commentaires et suggestions utiles du

personnes suivantes qui ont considérablement amélioré cet article : Martin Bureau, Adriana Durbala, Debra Elmegreen, William Keel, Jeffrey Kenney, Johan H. Knapen, Rebecca Koopmann, John Kormendy, Eija Laurikainen, Barry Madore, Karen L. Masters, Patrick M. Treuthardt, Sidney van den Bergh et Xiaolei Zhang. L'auteur remercie également Debra Elmegreen pour fournissant les images de galaxies à fort redshift présentées sur la figure 46, Masfumi Yagi pour le illustrations de la figure 29, et John Kormendy, Jason Surace, Donald P. Schneider et Rogier Windhorst pour l'utilisation d'illustrations publiées dans des articles spécifiques. Cet article utilise des images provenant de nombreuses sources, trop nombreuses pour être mentionnées ici, mais principalement tirées de le dVA, la base de données extragalactique NASA/IPAC, la Bright Spiral de l'Ohio State University Galaxy Survey (OSUBSGS), le Sloan Digital Sky Survey et plusieurs articles publiés par d'autres auteurs. La base de données extragalactique NASA/IPAC (NED) est exploitée par Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, sous contrat avec le National Administration de l'aéronautique et de l'espace. Le financement de l'OSUBSGS a été assuré par des subventions de la NSF (subventions AST 92-17716 et AST 96-17006), avec un financement supplémentaire du Université d'État de l'Ohio. Le financement pour la création et la distribution des archives SDSS a été fourni par la Fondation Alfred P. Sloan, les institutions participantes, la NASA, NSF, le Département américain de l'Énergie, le japonais Monbukagakusho et Max Planck Société. Des observations avec le télescope spatial NASA/ESA Hubble ont été obtenues au L'Institut scientifique du télescope spatial, géré par l'Association des universités pour Research in Astronomy, Inc., sous contrat NAS 5-26555. Le télescope spatial Spitzer est exploité par le Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, sous Contrat 1407 de la NASA. Le Two Micron All-Sky Survey est un projet conjoint de l'Université du Massachusetts et du Centre de traitement et d'analyse infrarouge/California Institute de technologie, financé par la National Aeronautics and Space Administration et le Fondation nationale de la science. GALEX est une mission de la NASA opérée par Jet Propulsion Laboratoire. Les données GALEX proviennent des archives multimiissions du Space Telescope Science

Institut (MAST). La prise en charge de MAST pour les données non-HST est fournie par le bureau de la NASA des sciences spatiales via la subvention NNX09AF08G et par d'autres subventions et contrats. Cet article a également utilisé THINGS, « The HI Near Galaxy Survey » (Walter et al. 2008), et BIMA-SONG, l'enquête Berkeley-Illinois-Maryland sur les galaxies voisines (Helfer et al. 2003).

LES RÉFÉRENCES

- Abraham, RG, van den Bergh, S., Glazebrook, K., Ellis, RS, Santiago, BX, Surma, P. et Griffiths, RE 1996, ApJS, 107, 1
- Abraham, RG, van den Bergh, S. et Nair, P. 2003, ApJ, 588, 218
- Aguerri, JAL, Méndez-Abreu, J. et Corsini, EM 2009, A&A, 495, 491
- Appleton, P. & Struck-Marcell, C. 1996, Fondements de la physique cosmique, 16, 111
- Arp, H. 1966, ApJS, 14, 1
- Arp, HC & Madore, BF 1987, Catalogue des galaxies et associations particulières du sud, Cambridge, Université de Cambridge. Presse
- Arribas, S., Bushouse, H., Lucas, RA, Colina, L. et Borne, KD 2004, AJ, 127, 2522
- Athanassoula, E. 1992, MNRAS, 259, 328
- Athanassoula, E. 2003, MNRAS, 341, 1179
- Athanassoula, E. 2005, MNRAS, 358, 1477
- Athanassoula, E. & Bosma, A. 1985, ARA&A, 23, 147
- Athanassoula, E. et al. 1990, MNRAS, 245, 130
- Athanassoula, E., Romero-Gomez, M. et Masdemont, JJ 2009a, MNRAS, 394, 67

- Athanassoula, E., Romero-Gomez, M., Bosma, A. et Masdemont, JJ 2009b, MNRAS, 400, 1706
- Bacon, R. et coll. 2001, MNRAS, 326, 23
- Bagetakos, I. Brinks, E., Walter, F., de Blok, WJG, Rich, J. W., Usero, A. et Kennicutt, RC 2009, dans The Evolving ISM in the Milky Way and Other Galaxies, K. Sheth, A. Noriega-Crespo, J. Ingalls et R. Paladini, éd., <http://ssc.spitzer.caltech.edu/mtgs/ismevo1>, E17
- Bagley, M., Minchev, I. et Quillen, AC 2009, MNRAS, 395, 537
- Bahcall, JN, Kirhakos, S., Saxe, DH et Schneider, DP 1997, ApJ, 479, 642
- Baldry, IK, Glazebrook, K., Brinkmann, J., Ivezić, Z., Lupton, RH, Nichol, RC et Szalay, AS 2004, ApJ, 600, 681
- Banerji, M. et coll. 2010, MRNR, 406, 342
- Barazza, FD, Binggeli, B. et Jerjen, H. 2002, AJ, 124, 1954
- Barazza, FD, Jogee, S. et Marinova, I. 2008, ApJ, 675, 1194
- Barway, S., Khembavi, A., Wadadekar, Y., Ravikumar, CD et Mayya, YD 2007, ApJ, 661, L37
- Barway, S., Wadadekar, Y. et Khembavi, AK 2011, MNRAS, 410, L18
- Beckwith, SVW et coll. 2006, AJ, 132, 1729
- Bell, E. et coll. 2004, ApJ, 608, 752
- Belokurov, V. et al. 2007, ApJ, 654, 897
- Bershady, M., Jangren, A. et Conselice, CJ 2000, AJ, 119, 2645

- Bertin, G., Lin, CC, Lowe, SA et Thurstans, RP 1989, ApJ, 338, 78
- Bertola, F. 1987, dans IAU Symp. 127, p. 135
- Bertin, G. et Amorisco, NC 2010, A&A, 512, 17
- Binggeli, B., Sandage, A. et Tammann, GA 1985, AJ, 90, 1681
- Binney, J. 1992, ARA&A, 30, 51
- Blakeslee, JP 1999, AJ, 118, 1506
- Block, DL, Bertin, G., Stockton, A., Grosbol, P., Moorwood, AFM, Peletier, RF
1994, A&A, 288, 365
- Block, D., Freeman, KC, Puerari, I., Combes, F., Buta, R., Jarrett, T. et Worthey, G.
2004a, dans Barres pénétrantes à travers des masques de poussière cosmique, éd. Bloc DL, I. Puerari,
KC Freeman, R. Groess et E. Block, Springer, Kluwer, p. 15
- Block, DL, Freeman, KC, Jarrett, TH, Puerari, I., Worthy, G., Combes, F. et Groess,
R. 2004b, A&A, 425, L37
- Block, DL, Puerari, I., Elmegreen, BG, Elmegreen, DM, Fazio, GG et Gehrz, R.
D. 2009, ApJ, 694, 115
- Livre, LG et Benson, AJ 2010, ApJ, 716, 810
- Bothun, G., Impey, CD, Malin, DF et Mould, JR 1987, AJ, 94, 23.
- Bournaud, F. & Combes, F. 2002, A&A, 392, 83
- Brook, C., Governato, F., Quinn, T., Wadsley, J., Brooks, AM, Willman, B., Stilp, A. et
Jonsson, P. 2008, ApJ, 689, 678
- Bureau, M., Aronica, G., Athanassoula, E., Dettmar, R.-J., Bosma, A., Freeman, KC

2006, MNRAS, 370, 753

Bush, SJ et Wilcots, EM 2004, AJ, 128, 2789

Buta, R. 1987, ApJS, 64, 1

Buta, R. 1995, ApJS, 96, 39

Buta, R. & Block, DL 2001, ApJ, 550, 243

Buta, R. & Combes, F. 1996, Fonds. Physique cosmique. 17, 95

Buta R. & Crocker DA 1993, AJ, 106, 939

Buta, R., Byrd, G. et Freeman, T. 2003, AJ, 125, 634.

Buta, RJ, Corwin, HG et Odewahn, SC 2007, L'Atlas des Galaxies de Vaucouleurs,
Cambridge : Cambridge U. Press (dVA)

Buta, RJ, Knapen, JK, Elmegreen, BG, Salo, H., Laurikainen, E., Elmegreen, DM,
Puerari, I. et Block, DL 2009, AJ, 137, 4487

Buta, R. et coll. 2010a, ApJS, 190, 147

Buta, R., Laurikainen, E., Salo, H. et Knapen, JH 2010b, ApJ, 721, 259

Buta, R., Mitra, S., de Vaucouleurs, G., & Corwin, HG 1994, AJ, 107, 118

Buta, R., Laurikainen, E., Salo, H., Block, DL et Knapen, JH 2006, AJ, 132, 1859

Buta, R. et Zhang, X, 2009, ApJS, 182, 559

Butcher, H. & Oemler, A. 1978, ApJ, 219, 18

Byrd, GG, Rautiainen, P. Salo, H., Buta, R. et Crocker, DA 1994, AJ, 108, 476

Caon, N., Capaccioli, M. et D'Onofrio, M. 1993, MNRAS, 265, 1013

- Cappellari, M. et coll. 2011, astro-ph 1012.1551
- Cardemone, C. et al. 2009, MNRAS, 399, 1191
- Carignan, C. et Purton, C. 1998, ApJ, 506, 125
- Carollo, CM, Stiavelli, M., de Zeeuw, PT et Mack, J. 1997, AJ, 114, 2366
- Cayatte, V., Kotanyi, C., Balkowski, C. et van Gorkom, JH 1994, AJ, 107, 1003
- Chapman, SC, Windhorst, R., Odewahn, S. et coll. 2003, ApJ, 599, 92
- Chung, A., van Gorkom, JH, Kenney, JDP, Crowl, Hugh et Vollmer, B. 2009, AJ, 138, 1741
- Cole, AA et coll. 2007, ApJ, 659, L17
- Comerón, S., Knapen, JH, Beckman, JE, Laurikainen, E., Salo, H., Martinez-Valpuesta, I., & Buta, RJ 2010, MNRAS, 402, 2462
- Comerón, S., Martinez-Valpuesta, I., Knapen, JH et Beckman, J. 2009, ApJ, 706, L25
- Conselice, CJ 1997, PASP, 109, 1251
- Conselice, CJ 2003, ApJS, 147, 1
- Conselice, CJ et coll. 2004, ApJ, 600, L139
- Conselice, CJ, Rajgor, S. et Myers, R. 2008, MNRAS, 386, 909
- Conselice, CJ 2009, MNRAS, 399, L16
- Conselice, CJ et Arnold, J. 2009, MNRAS, 397, 208
- Contopoulos, G. 1996, ASP Conf. Ser. 91, p. 454
- Contopoulos, G. & Grosbol, P. 1989, Astr. Astrophysique. Rév.1, 261

- Cowie, L., Hu, E. et Songaila, A. 1995, AJ, 110, 1576
- Crocker, DA, Baugus, PD et Buta, R. 1996, ApJS, 105, 353
- Cullen, H., Alexander, P., Green, DA et Sheth, K. 2007, MNRAS, 376, 98
- Darg, DW et coll. 2010, MRNS, 401, 1043
- Davies, RL, Efstathiou, G., Fall, SM, Illingworth, G. et Schechter, PL 1983, ApJ, 266, 41
- de Vaucouleurs, G. 1956, Mem. Comm. Obs., 3, n° 13
- de Vaucouleurs, G. 1958, ApJ, 127, 487
- de Vaucouleurs, G. 1959, Handbuch der Physik, 53, 275
- de Vaucouleurs, G. 1961, ApJS, 5, 233
- de Vaucouleurs, G. 1963, ApJS, 8, 31
- de Vaucouleurs, G. & Freeman, KC 1972, Vistas in Astronomy 14, 163
- de Vaucouleurs, G. de Vaucouleurs, A., & Corwin, HG (1976), Deuxième catalogue de référence des galaxies brillantes, Univ. Texas Mono. Astr. N°2 (RC2)
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, HG, Buta, R., Paturel, G., & Fouque´, P. 1991, Troisième catalogue de référence des galaxies lumineuses, New York, Springer (RC3)
- de Zeeuw, PT et coll. 2002, MNRAS, 329, 513
- Djorgovski, S. 1992, dans Classification morphologique et physique des galaxies, G. Longo, M. Capaccioli et G. Busarello, éd., Dordrecht, Kluwer, p. 337
- Dressler, A. 1980, ApJ, 236, 351
- Durbala, A., Buta, R., Sulentic, JW et Verdes-Montenegro, L. 2009, MNRAS, 397, 1756

Durbala, A., Sulentic, JW, Buta, R. et Verdes=Monténégro, L. 2008, MNRAS, 390, 881

Elmegreen, DM 1981, ApJS, 47, 229

Elmegreen, DM et Elmegreen, BG 1987, ApJ, 314, 3

Elmegreen, D. et Elmegreen, BG 2006, ApJ, 651, 676 (EE06)

Elmegreen, D., Elmegreen, BG et Sheets, C. 2004, ApJ, 603, 74 (EES04)

Elmegreen, D., Elmegreen, BG et Ferguson, TE 2005, ApJ, 623, L71

Elmegreen, D., Elmegreen, BG, Ferguson, TE et Mullan, B. 2007a, ApJ, 663, 734
(EEFM07)

Elmegreen, DM, Elmegreen, BG, Ravindranath, S. et Coe, DA 2007b, ApJ, 658, 763

Elmegreen, D., Elmegreen, BG et Hirst, A. 2004, ApJ, 604, L21 (EEH04)

Elmegreen, DM, Elmegreen, BG, Marcus, MT, Shainyan, K., Yau, A. et Petersen,
M. 2009b, ApJ, 701, 306

Elmegreen, BG, Bournaud, F. et Elmegreen, DM 2008, ApJ, 688, 67

Elmegreen, BG, Elmegreen, DM et Leitner, SN 2003, ApJ, 590, 271 (EEL03)

Elmegreen, BG, Elmegreen, DM et Monténégro, L. 1992, ApJS, 79, 37

Elmegreen, BG, Elmegreen, DM, Fernandez, MX et Lemonias, JJ 2009a, ApJ, 692,
12

Emsellem, E. et al. 2007, MRNR, 379, 401

Eskridge, PB et coll. 2000, AJ, 119, 536

Eskridge, PB et coll. 2002, ApJS, 143, 73

Fazio, GG et coll. 2004, ApJS, 154, 10

Ferguson, HC et Binggeli, B. 1994, Astr. Ap. Rév. 6, 67

Ferrarese, L. et al. 2006, ApJS, 164, 334

Freeman, KC 1975, dans Galaxies et l'Univers, A. Sandage, M. Sandage et J. Kristian, éd., Chicao, University of Chicago Press, p. 409

Garcia-Ruiz, I., Sancisi, R. et Kuijken, K. 2002, A&A, 394, 769.

Giavalisco, M. et al. 2004, ApJ, 600, L93

Gil de Paz, A., Madore, BF et Pevunova, O. 2003, ApJS, 147, 29

Gil de Paz, A. et coll. 2005, ApJ, 627, L29

Gillett, FC, Forrest, WJ et Merrill, KM 1973, ApJ, 183, 87

Giovanelli, R. et Haynes, député 1985, AJ, 292, 404

Graham, AW & Guzmán, R. 2003, AJ, 125, 2936

Grouchy, RD, Buta, R., Salo, H., Laurikainen, E. et Speltincx, T. 2008, AJ, 136, 980

Grouchy, RD, Buta, RJ, Salo, H. et Laurikainen, E. 2010, AJ, 139, 2465

Gunn, JE et Gott, JR 1972, ApJ, 176, 1

Gunn, JE et coll. 1998, AJ, 116, 3040

Helfer, TT, Thornley, MD, Regan, MW, Wong, T., Sheth, K., Vogel, SN, Blitz, L., & Bock, DC-J. 2003, ApJS, 145, 259

Hélou, G. et al. 2004, ApJS, 154, 253

Higdon, JL 1995, ApJ, 455, 524

Higdon, JL, Buta, RJ et Purcell, GB 1998, AJ, 115, 80

Holmberg, E. 1950, Medd. Lunds. Astrone. Obs., Sér. II, n° 128

Holwerda, BW, Keel, WC, Williams, B., Dalcanton, JJ et de Jong, RS 2009, AJ, 137, 3000

Hubble, E. 1926, ApJ, 64, 321

Hubble, E. 1936, Le royaume des nébuleuses, Yale Univ. Presse, Yale.

Hubble, E. 1943, ApJ, 97, 112

Hunt, LK et Malkan, MA 1999, ApJ, 516, 660

Hunter, DA 1997, PASP, 109, 937

Impey, C. & Bothun, GD 1997, ARA&A, 35, 267

Irwin, MJ et coll. 2007, ApJ, 656, L13

Jarrett, TH et coll. 2003, AJ, 125, 525

Jeans, J. 1929, Astronomie et Cosmogonie, Cambridge, Cambridge University Press

Jerjen, H., Kalnajs, A. et Binggeli, B. 2000, A&A, 358, 845.

Jogee, S. et coll. 2009, ApJ, 697, 1971

Jokimaki, A., Orr, H. et Russell, DG 2008, AP&SS, 315, 249

Karachentseva, VE 1973, Astrofiz. Issled-Izv. Spets. Astrofiz. Obs. 8, 3

Karataeva, directeur général, Tikhonov, NA, Galazutdinova, OA, Hagen-Thorn, VA et Yakovleva, VA 2004, A&A, 421, 833

Kennicutt, RC, Tamblin, P. et Congdon, CW 1994, ApJ, 435, 22

Kerr, F. & de Vaucouleurs, G. 1955, Australian Journal of Physics, 8, 508

Knapen, JH 2005, A&A, 429, 141.

Knapen, J., Beckman, JE, Shlosman, I., Peletier, RF, Heller, CH et de Jong, RS
1995a, ApJ, 443, L73

Knapen, J., Beckman, JE, Heller, CH, Shlosman, I. et de Jong, RS 1995b, ApJ, 454,
623

Knapen, JH, Shlosman, I. et Peletier, RF 2000, ApJ, 529, 93

Knapen, JH 2010, dans Galaxies et leurs masques, DL Block, KC Freeman et I. Puerari,
éd., New York, Springer, sous presse

Knapen, JH et James, PA 2009, ApJ, 698, 1437

Koopmann, R. et Kenney, JDP 2004, ApJ, 613, 866

Kormendy, J. 1979, ApJ, 227, 714

Kormendy, J. 1985, ApJ, 295, 73

Kormendy, J. 1999, ASPC, 182, 124

Kormendy, J. et Bender, R. 1996, ApJ, 464, L119

Kormendy, J. et Djorgovski, S. 1989, ARA&A, 27, 235

Kormendy, J. et Kennicutt, RC 2004, ARA&A, 42, 603 (KK04)

Kormendy, J. et Norman, CA 1979, ApJ, 233, 539

Kormendy, J., Fisher, DB, Cornell, ME et Bender, R. 2009, ApJS, 182, 216

Kuijken, K. & Merrifield, MR 1995, ApJ, 443, L13

- Laine, S., Shlosman, I., Knapen, J. et Peletier, RF 2002, ApJ, 567, 97
- Laurikainen, E. & Salo, H. 2002, MNRAS, 337, 1118
- Laurikainen, E., Salo, H. et Buta, R. 2004, ApJ, 607, 103
- Laurikainen, E., Salo, H. et Buta, R. 2005, MNRAS, 362, 1319
- Laurikainen, E., Salo, H., Buta, R., Knapen, J., Speltincx, T. et Block, DL 2006, MNRAS, 132, 2634
- Laurikainen, E., Salo, H., Buta, R. et Knapen, J. 2007, MNRAS, 381, 401
- Laurikainen, E., Salo, H., Buta, R. et Knapen, J. 2009, ApJ, 692, L34
- Laurikainen, E., Salo, H., Buta, R., Knapen, JH et Comer'ón, S. 2010, MNRAS, 405, 1089
- Lelli, F., Fraternali, F. et Sancisi, R. 2010, A&A, 516, 11.
- Lintott, C. et coll. 2008, MNRAS, 389, 1179
- Lintott, C. et coll. 2009, MNRAS, 399, 129
- Lisker, T., Debattista, VP, Ferreras, I. et Erwin, P. 2006, MNRAS, 370, 477
- Lotz, JM, Madau, P., Gialalisco, M., Primack, J. et Ferguson, HC 2006, ApJ, 636, 592
- Lupton, R., Blanton, MR, Fekete, G., Hogg, DW, O'Mullane, W., Szalay, A. et Wherry, N. 2004, PASP, 116, 133
- Lynden-Bell, D. et Kalnajs, AJ 1972, MNRAS, 157, 1
- Madore, BF, Nelson, E. et Petrillo, K. 2009, ApJS, 181, 572
- Malin, DF et Carter, D. 1980, Nature, 285, 643
- Malin, DF et Carter, D. 1983, ApJ, 274, 534

- Martin, DC et coll. 2005, ApJ, 619, L1
- Martin, DC et coll. 2007, ApJS, 173, 342
- Martin, P. et Friedli, D. 1997, A&A, 326, 449
- Martinez-Valpuesta, I., Shlosman, I. et Heller, C. 2006, ApJ, 637, 214
- Martinez-Valpuesta, I., Knapen, JH et Buta, R. 2007, AJ, 134, 1863
- Maîtres, KL et al. 2010, MRNR, 405, 783
- Mateo, M. 1998, ARA&A, 36, 435
- Matthews, TA, Morgan, WW et Schmidt, M. 1964, ApJ, 140, 35
- Mazzuca, LM, Swaters, RA, Veilleux, S. et Knapen, JH 2009, BAAS, 41, 693
- McGaugh, S., Schombert, JM et Bothun, GD 1995, AJ, 109, 2019
- McKernan, B., Ford, KES et Reynolds, CS 2010, astro-ph 1005.4907
- Menanteau, F., Abraham, RG et Ellis, RS 2001, MNRAS, 322, 1
- Ménanteau, F. et al. 2004, ApJ, 612, 202
- Meurer, GR, Carignan, C., Beaulieu, SF et Freeman, KC 1996, AJ, 111, 1551
- Moore, B., Katz, N., Lake, G., Dressler, A. et Oemler, A. 1996, Nature, 379, 613.
- Morgan, Guerre mondiale 1958, PASP, 70, 364
- Nair, PB et Abraham, RG 2010, ApJS, 186, 427
- Odewahn, SC 1991, AJ, 101, 829
- Odewahn, SC, Stockwell, EB, Pennington, RL, Humphreys, RM et Zumach, WA 1992, AJ, 103, 318

Oosterloo, TA, Morganti, R., Sadler, EM, Vergani, D. et Caldwell, N. 2002, AJ, 123, 729

Pahre, M., Ashby, MLN, Fazio, GG et Willner, SP 2004, ApJS, 154, 235

Pence, WD, Taylor, K., Freeman, KC, de Vaucouleurs, G. et Atherton, P. 1988, ApJ, 326, 564

Peng, CY, Ho, LC, Impey, CD et Rix, HW. 2010, AJ, 139, 2097

Pereira-Santaella, M., Alonso-Herrero, A., Rieke, GH, Colina, L. D'íaz-Santos, T., Smith, J.-DT, P'erez-Gonz'alez, PG et Engelbracht, CW 2010, ApJS, 188, 447

Quillen, AC, Frogel, JA et González, RA 1994, ApJ, 437, 162.

Rahman, N., Howell, JH, Helou, G., Mazzarella, JM et Buckalew, B. 2007, ApJ, 663, 908

Rautiainen, P. & Salo, H. 2000, A&A, 362, 465

Rautiainen, P., Salo, H. et Buta, R. 2004, MNRAS, 349, 933

Ravindranath, S. et al. 2006, ApJ, 652, 963

Regan, M. et Teuben, P. 2003, ApJ, 582, 723

Regan, M. et Teuben, P. 2004, ApJ, 600, 595

Regan, MW, Thornley, MD, Helfer, TT ; Sheth, K., Wong, T., Vogel, SN, Blitz, L., & Bock, DC-J. 2001, ApJ, 561, 218

Regan, M. et coll. 2004, ApJS, 154, 204

Reynolds, JH 1927, Observatoire, 50, 185

Revaz, Y. et Pfenniger, D. 2007, dans Univers insulaires, astrophysique et sciences spatiales

Actes, p. 149

Rieke, GH et Low, FJ 1972, ApJ, 176, L95

Rix, H.-W. & Rieke, MJ 1993, ApJ, 418, 123

Rix, H.-W. et coll. 2004, ApJS, 152, 163

Romano, R., Mayya, YD et Vorobyov, EI 2008, AJ, 136, 1259

Romero-Gomez, M., Masdemont, JJ, Athanassoula, E., & García-Gomez, C. 2006, A&A, 453, 39

Romero-Gomez, M., Athanassoul, E., Masdemont, JJ, & García-Gomez, C. 2007, A&A, 472, 63

Ryder, SD, Buta, RJ, Toledo, H., Shukla, H. Staveley-Smith, L. et Walsh, W. 1996, ApJ, 460, 665

Sackett, PD, Rix, H.-W., Jarvis, BJ et Freeman, KC 1994, ApJ, 436, 629

Saha, K., de Jong, R. et Holwerda, B. 2009, MNRAS, 396, 409

Salo, H. et Laurikainen, E. 2000a, MNRAS, 319, 377

Salo, H. et Laurikainen, E. 2000b, MNRAS, 319, 393

Salo, H., Laurikainen, E., Buta, R. et Knapen, JH 2010, ApJ, 715, L56

Sandage, A. 1961, L'Atlas Hubble des Galaxies, Carnegie Inst. de Wash. Publ. N° 618

Sandage, A. 1975, dans Galaxies et Univers, Étoiles et Systèmes Stellaires, Vol. IX, A.

Sandage, M. Sandage et J. Kristian, éd., p. 1.

Sandage, A. & Bedke, J. 1994, L'Atlas Carnegie des Galaxies, Carnegie Inst. de Wash. Pub. N° 638

Sandage, A. & Binggeli, B. 1984, AJ, 89, 919

Sandage, A. & Tammann, GA 1981, Un catalogue Shapley-Ames révisé des galaxies lumineuses, Institut Carnegie de Washington Pub. N° 635 (première édition) (RSA)

Sanders, DB et Mirabel, IF 1996, ARA&A, 34, 749

Schawinski, K., Thomas, D., Sarzi, M., Maraston, C., Kaviraj, S., Joo, S., Yi, SK et Silk, J. 2007, MNRAS, 382, 1415

Schombert, J. 1986, ApJS, 60, 603

Schombert, J. 1987, ApJS, 64, 643

Schombert, J. 1988, ApJ, 328, 475

Schombert, J., Pildis, RA, Eder, JA et Oemler, A. 1995, AJ, 110, 2067

Schwarz, député 1981, ApJ, 247, 77

Schwarz, député 1984, MNRAS, 209, 93

Schweizer, F. 1998, dans Galaxies : interactions et formation d'étoiles induite, RC Kennicutt, et al., éd., Berlin, Springer, p. 105

Schweizer, F. & Seitzer, P. 1988, ApJ, 328, 88

Schweizer, F., Ford, WK, Jedrzejewski, R. et Giovanelli, R. 1987, ApJ, 320, 454.

Schweizer, F., van Gorkom, J. et Seitzer, P. 1989, ApJ, 338, 770

Scoville, N. et coll. 2007, ApJS, 172, 38

Seiden, PE & Gerola, H. 1982, Fonds. Physique cosmique. 7, 241

Seigar, MS, Block, DL, Puerari, I., Chorney, NE et James, PA 2005, MNRAS, 359, 1065

- Seigar, MS, Kennefick, D., Kennefick, J. et Lacy, CH 2008, ApJ, 678, L93
- Sellwood, JA 2010, dans Planètes, étoiles et systèmes stellaires, Vol. 5, en production
- Sellwood, JA et Wilkinson, A. 1993, Rapports sur les progrès en physique, 56, 173
- Shamir, L. 2009, MNRAS, 399, 1367
- Sheth, K. et coll. 2008, ApJ, 675, 1141
- Sheth, K. et coll. 2010, PASP, 122, 1397
- Sil'chenko, OK & Afanasiev, VL 2004, AJ, 127, 2641
- Simkin, SM, Su, HJ et Schwarz, MP 1980, ApJ, 237, 404
- Skrutskie, MF et coll. 2006, AJ, 131, 1163
- Sparke, LS, van Moorsel, G., Erwin, P. et Wehner, EMH 2008, AJ, 135, 99
- Spitzer, L. & Baade, W. 1951, ApJ, 113, 413
- Steidel, C. et Hamilton, D. 1992, AJ, 104, 941
- Steidel, C., Giavalisco, M., Dickinson, M. et Adelberger, K. 1996, AJ, 112, 352
- Strateva, I. et coll. 2001, AJ, 122, 1861
- Frappé, C. 2010, MNRAS, 403, 1516
- Struck, C., Appleton, PN, Borne, KD et Lucas, RA 1996, AJ, 112, 1868
- Sulentic, J. et coll. 2006, A&A, 449, 937
- Surace, JA, Sanders, DB, Vacca, WD, Veilleux, S. et Mazzarella, JM 1998, ApJ, 492, 116
- Taniguchi, Y. & Watanabe, M. 1987, ApJ, 313, 89

Taylor-Mager, VA, Conselice, CJ, Windhorst, RA et Jansen, RA 2007, ApJ, 659, 162

Theis, C., Sparke, L. et Gallagher, J. 2006, A&A, 446, 905

Theys, JC & Spiegel, JC 1976, ApJ, 208, 650

Thilker, DA et coll. 2010, ApJ, 714, L171

Thornley, M. 1996, ApJ, 469, 45

Thuan, Texas et Martin, GE 1981, ApJ, 247, 823

Thuan, Texas, Izotov, YI, Lipovetsky, VA 1997, ApJ, 477, 661.

Tolstoï, E., Hill, V. et Tosi, M. 2009, ARA&A, 47, 371.

Treuthardt, P., Salo, H., Rautinainen, P. et Buta, R. 2008, AJ, 136, 300

Vaisanen, P., Ryder, S., Mattila, S. et Kotilainen, J. 2008, ApJ, 689, L37

van den Bergh, S. 1980a, PASP, 92, 122

van den Bergh, S. 1980b, PASP, 92, 409

van den Bergh, S. 1995, AJ, 110, 613

van den Bergh, S. 1998, Morphologie et classification des galaxies, Cambridge, Cambridge
Presse universitaire

van den Bergh, S. 2009a, ApJ, 694, L120

van den Bergh, S. 2009b, ApJ, 702, 1502

van den Bergh, S., Abraham, RG, Ellis, RS, Tanvir, NR, Santiago, BX et
Glazebrook, KG 1996, AJ, 112, 359

- van den Bergh, S., Cohen, JG, Hogg, DW et Blandford, R. 2000, AJ, 120, 2190
- van den Bergh, S., Pierce, M. et Tully, RB 1990, ApJ, 359, 4
- van der Wel, A., Bell, EF, Holden, BP, Skibba, RA et Rix, H.-W. 2010, ApJ, 714, 1779
- van Driel, W. et coll. 1995, AJ, 109, 942
- Vanzi, L. et Sauvage, M. 2004, A&A, 415, 509.
- Verdes-Montenegro, L., Sulentic, J., Lisenfeld, U., Leon, S., Espada, D., Garcia, E., Sabater, J. et Verley, S. 2005, A&A, 436, 443
- Veron-Cetty, M. et Veron, P. 2006, A&A, 455, 773
- Volonteri, M., Saracco, P., Chincarini, G. et Bolzonella, M. 2000, A&A, 362, 487.
- Walter, F., Brinks, E., de Blok, WJG, Bigiel, F., Kennicutt, RC, Thornley. MD, & Leroy, A. 2008, AJ, 136, 2563
- Blanc, RE & Keel, WC 1992, Nature, 359, 129
- Whitmore, BC, Lucas, RA, McElroy, DB, Steiman-Cameron, TY, Sackett, PD et Olling, RP 1990, AJ, 100, 1489
- Williams, RE et coll. 1996, ApJ, 112, 1335
- Willman, B. et coll. 2005, ApJ, 626, L85
- Willner, S. et coll. 2004, ApJS, 154, 222
- Windhorst, R. et coll. 2010, ApJS, mai 2010, sous presse
- Wirth, A. & Gallagher, JS 1984, ApJ, 282, 85
- Wyder, TK et coll. 2007, ApJS, 173, 293

Yagi, M., Yoshida, M., Komiyama, Y., Kashikawa, N. ; Furusawa, H., Okamura, S., Graham, AW ; Miller, Caroline du Nord ; Carter, D., Mobasher, B. et Jogee, S. 2010, AJ, 140, 1814

York, DG et coll. 2000, AJ, 120, 1579

Zhang, X. 1996, ApJ, 457, 125

Zhang, X. 1998, ApJ, 499, 93

Zhang, X. 1999, ApJ, 518, 613

Zhang, X. et Buta, R. 2007, AJ, 133, 2584

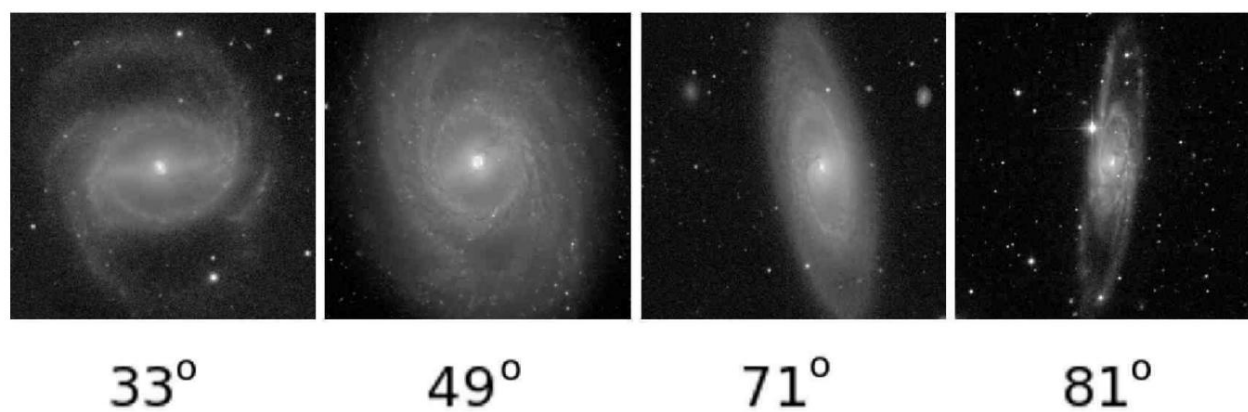


Fig. 1.— Quatre galaxies de morphologie probablement similaire, vues de face sous différentes inclinaisons (numéro sous chaque image). Les galaxies sont (de gauche à droite) : NGC 1433, NGC 3351, NGC 4274 et NGC 5792. Les images proviennent du dVA (filtres B et g).

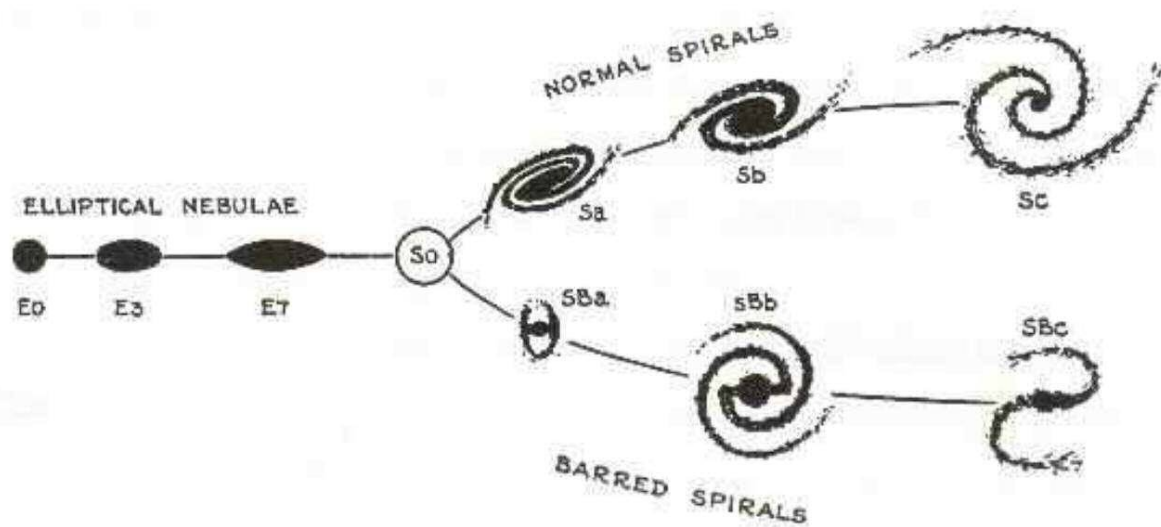


Fig. 2.— Le « diapason » de Hubble (1936) sur la morphologie des galaxies est à la base des classification des galaxies.

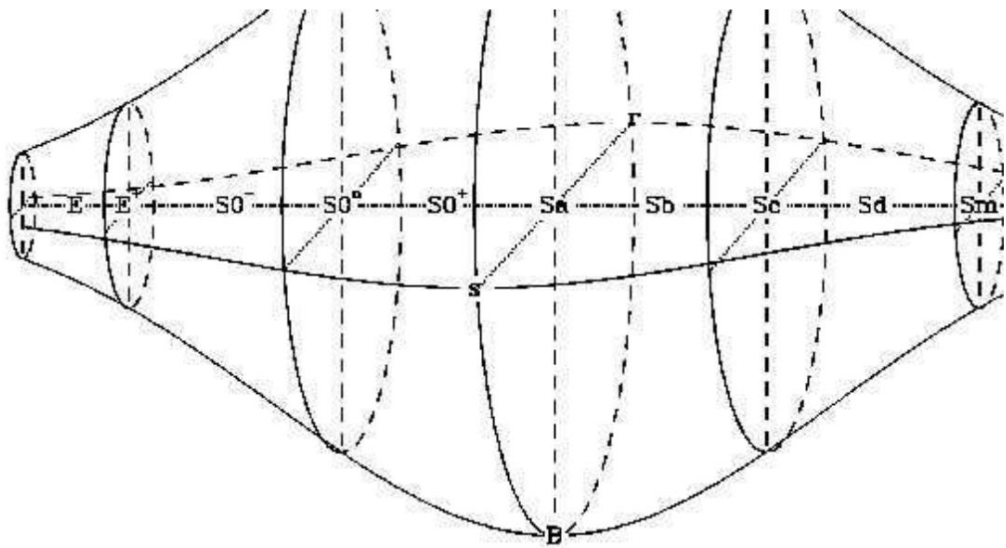


Fig. 3.— Le volume de classification de Vaucouleurs (1959), une révision et une extension de la Diapason de Hubble. Les trois dimensions sont la scène (type Hubble), la famille (apparente résistance de la barre) et la variété (présence ou absence d'un anneau intérieur).

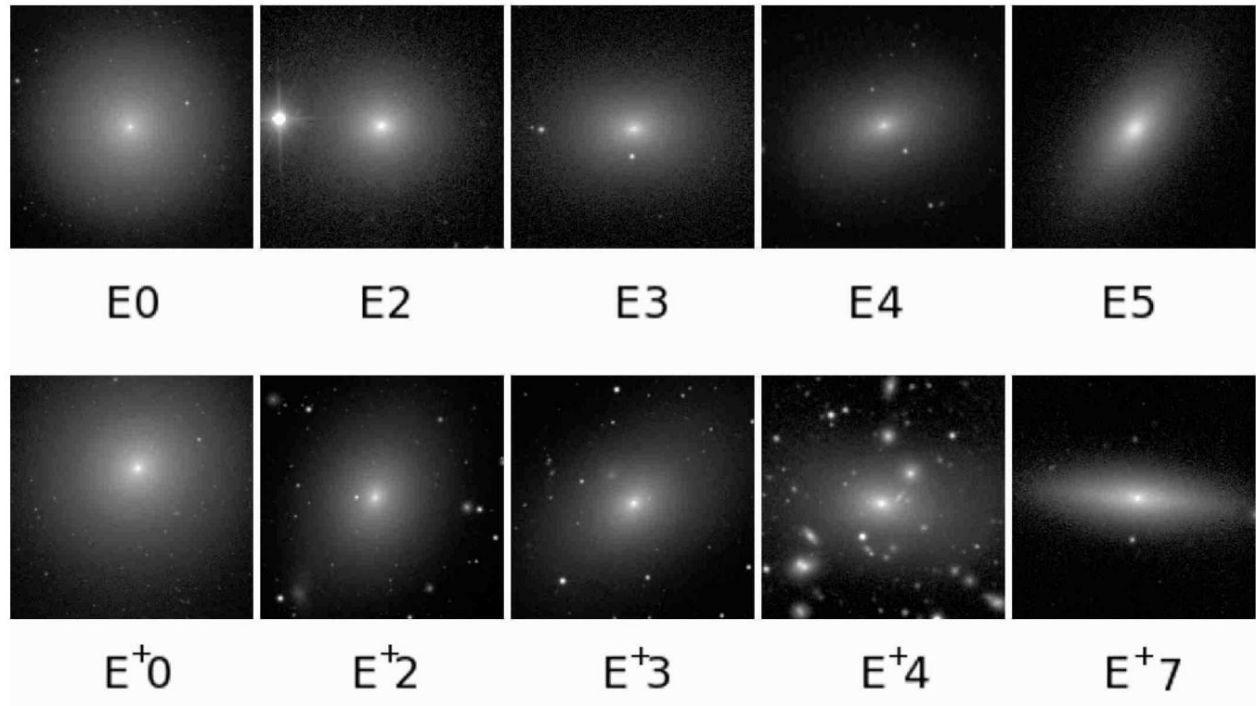


Fig. 4.— Exemples de galaxies elliptiques de différentes formes projetées. Les galaxies de type E sont des galaxies elliptiques normales sans détails structurels. De gauche à droite, les galaxies représentées sont NGC 1379, 3193, 5322, 1426 et 720. Les galaxies de type E+ sont des galaxies elliptiques « tardives », qui peuvent inclure de faibles enveloppes étendues typiques des grands clusters elliptiques, ou de simples types de transition vers S0-. Les exemples présentés sont (de gauche à droite) : NGC 1374, 4472, 4406, 4889 et 4623. Tous ces les images proviennent du dVA (filtres B, V, et g).

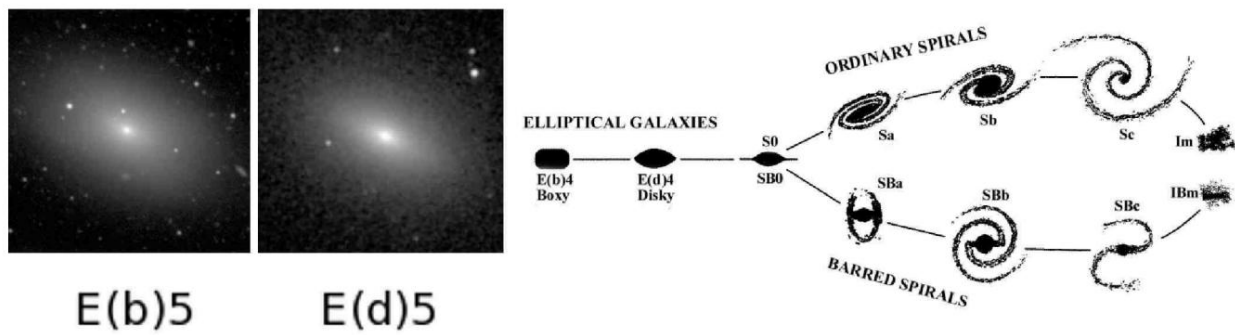


Fig. 5.— Classification révisée des galaxies elliptiques de Kormendy & Bender (1996), telle que schématiquement incorporé dans le « diapason » de Hubble (1936). À gauche, deux exemples d'elliptiques boxy et diskly : NGC 7029 (gauche, bande B) et NGC 4697 (composite JHK, 2MASS image de NED).

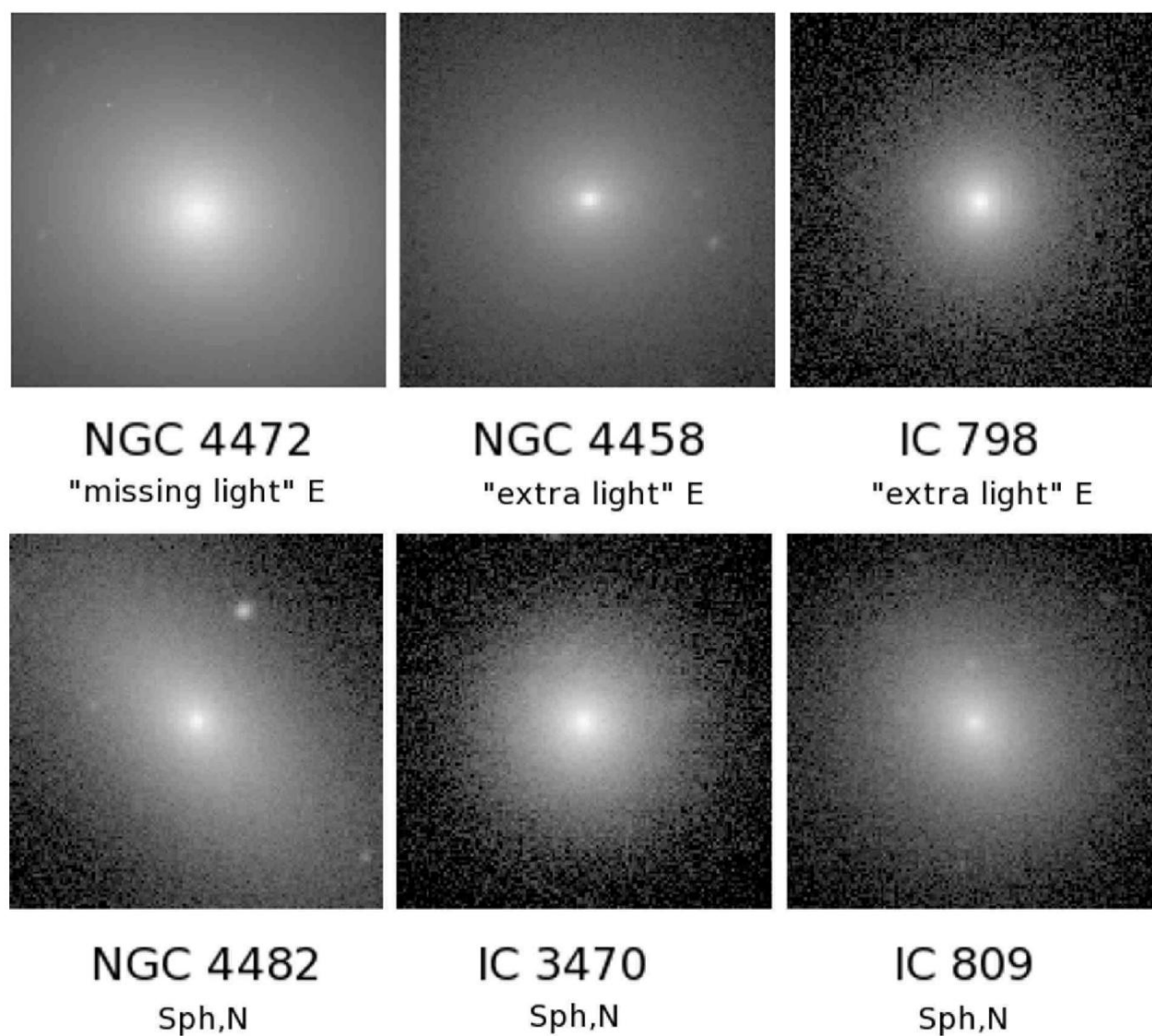


Fig. 6.— Illustrations de 6 galaxies de type précoce dans l'amas de la Vierge avec classes photométriques.

sifications de Kormendy et al. (2009) : NGC 4472 (noyau E, $M_V = -23,2$) ; NGC4458

(E sans noyau, $M_V = -19,0$) ; IC 798 (VCC 1440 ; 'sans noyau E, $M_V = -16,9$) ; NGC 4482 (nu-

sphéroïdal à taquets, $M_V = -18,4$) ; IC 3470 (VCC 1431 ; sphéroïdal nucléé, $M_V = -17,4$) ;

IC 809 (VCC 1910 ; sphéroïdal nucléé, $M_V = -17,4$). Les images présentées sont toutes basées sur

Images SDSS g-band simples ou mosaïques, et sont en unités de mag arcsec^{-2} .

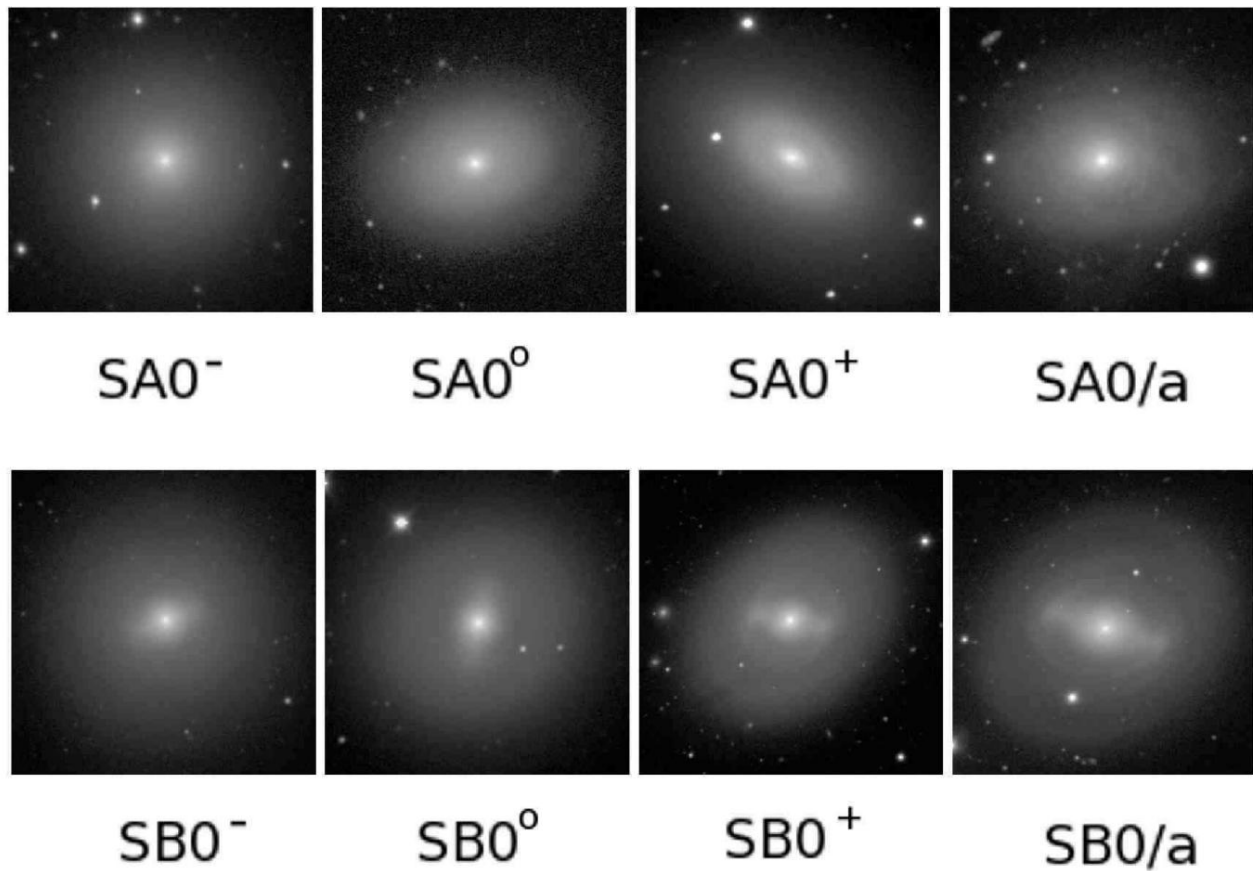


Fig. 7.— Exemples de galaxies S0 barrées et non barrées de différents stades du « début »

(S0–), à « intermédiaire » (S0o), à « tardif » (S0+), y compris l'étape de transition vers les spirales,

S0/a. Les galaxies illustrées sont (de gauche à droite) : Rangée 1 – NGC 7192, 1411, 1553 et 7377 ; Rangée

2 - NGC 1387, 1533, 936 et 4596. Toutes les images proviennent du dVA (filtres B et V).

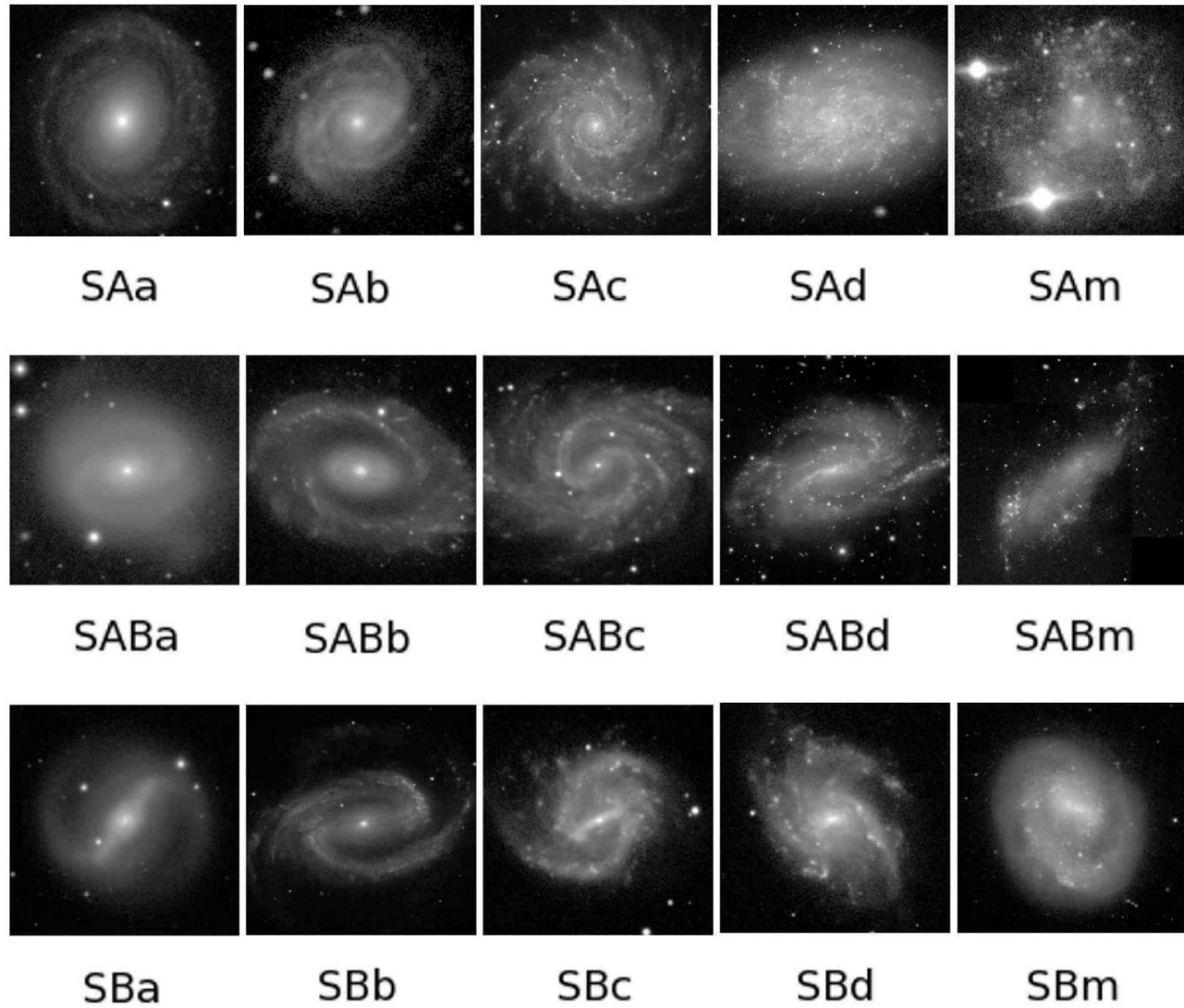


Fig. 8.— Classifications d'étapes pour les spirales, divisées selon les classifications des barres en parallèles séquences. Les galaxies illustrées sont (de gauche à droite) : Rangée 1 - NGC 4378, 7042, 628, 7793, et IC 4182 ; Rangée 2 : NGC 7743, 210, 4535, 925 et IC 2574 ; Rangée 3 - NGC 4314, 1300, 3513, 4519 et 4618. Toutes les images sont en bande B du dVA.

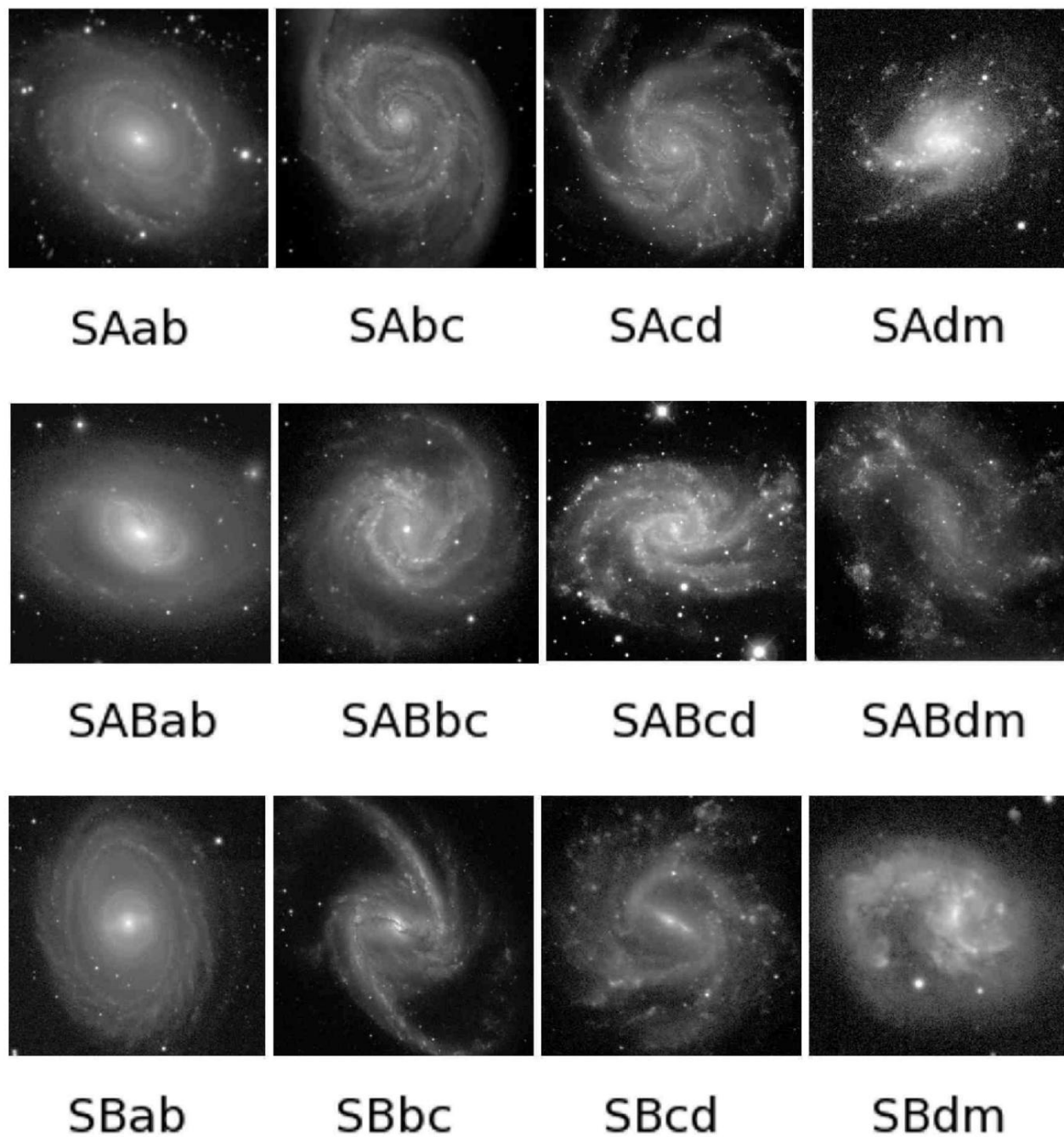


Fig. 9.— Séquences d'étapes intermédiaires entre les étapes principales illustrées à la figure 8.

Les galaxies sont (de gauche à droite) : Rangée 1 – NGC 2196, 5194, 5457 et 4534 ; Rangée 2 - MBAC 3368, 4303, 2835 et 4395 ; Rangée 3 - NGC 1398, 1365, 1073 et 4027. Toutes les images sont en bande B du dVA, à l'exception de NGC 4534, qui est en bande g SDSS.

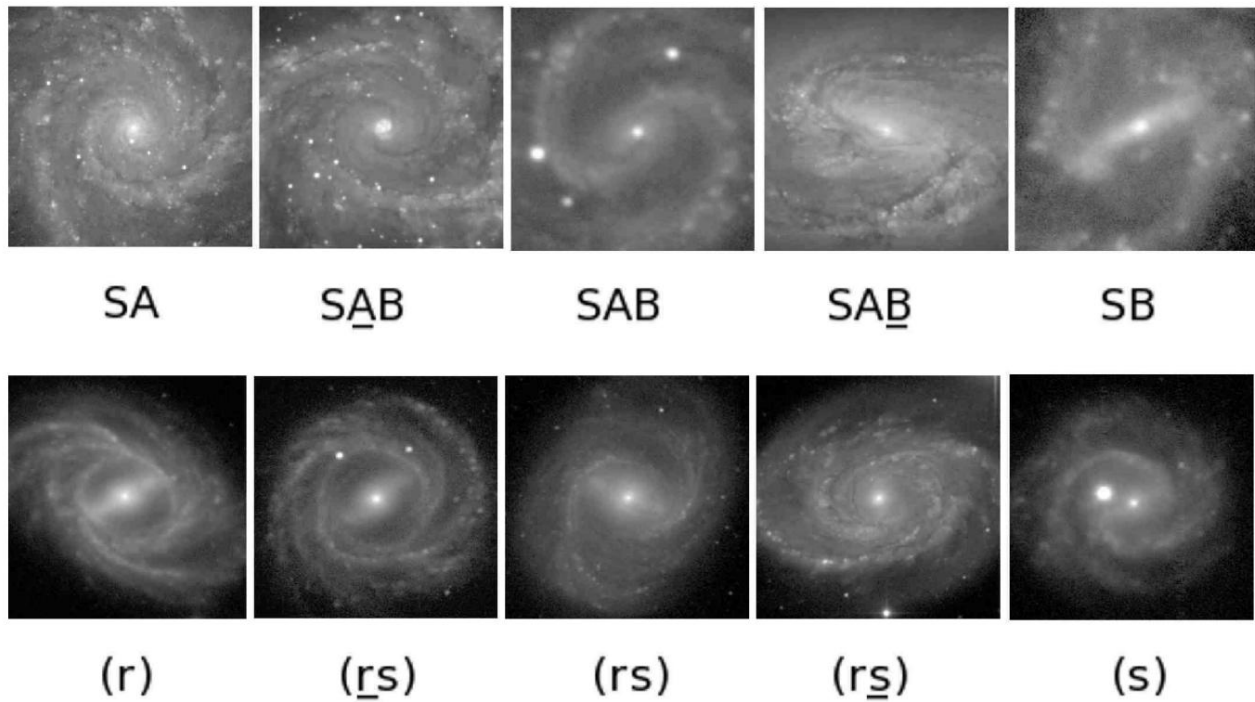


Fig. 10.— La continuité des caractéristiques familiales et variétales parmi les galaxies spirales, y compris classifications soulignées utilisées par de Vaucouleurs (1963). Les galaxies sont (de gauche à droite) :
 Rangée 1 : NGC 628, 2997, 4535, 3627 et 3513 ; Rangée 2 - NGC 2523, 3450, 4548, 5371 et 3507. Toutes les images sont en bande B du dVA.

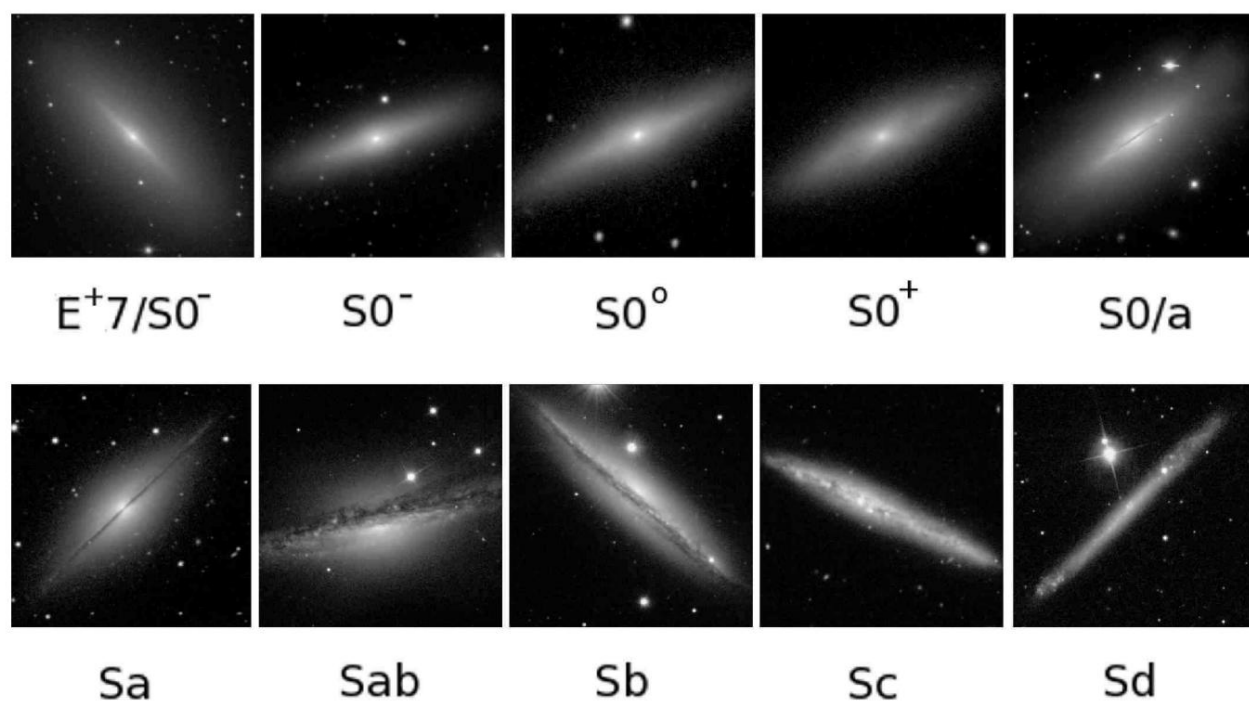


Fig. 11.— Classification des galaxies de tranche par étage. Les galaxies sont (de gauche à droite) : Row 1 - NGC 3115, 1596, 7332, 4425 et 5866 ; Rangée 2 – NGC 7814, 1055, 4217, 4010 et IC 2233. Toutes les images proviennent du dVA (filtres B et V).

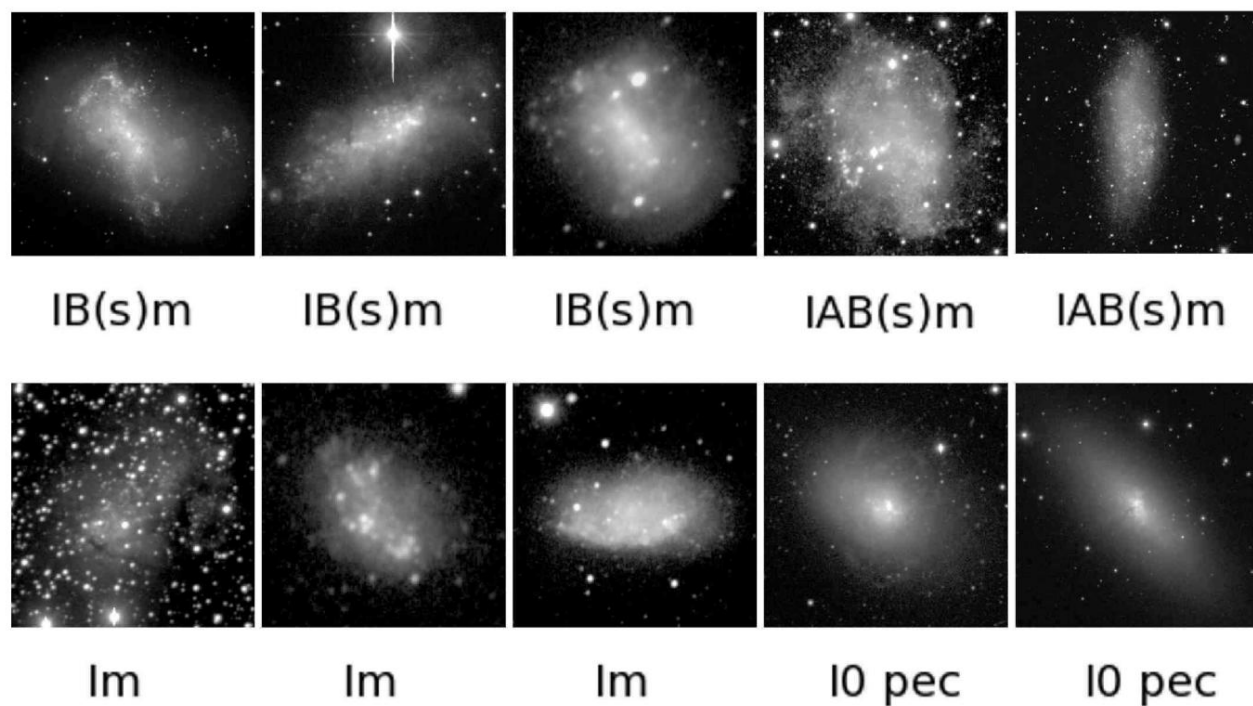


Fig. 12.— Exemples de galaxies irrégulières dont la magnitude bleue absolue varie de -14 à -18 . Les galaxies sont (de gauche à droite) : Rangée 1 – NGC 4449, 1569, 1156, DDO 50 et A2359-15 (Galaxie WLM) ; Rangée 2 - IC 10, DDO 155, DDO 165, NGC 1705, NGC 5253. Le « pec » signifie particulier. Toutes les images sont en bande B du dVA.

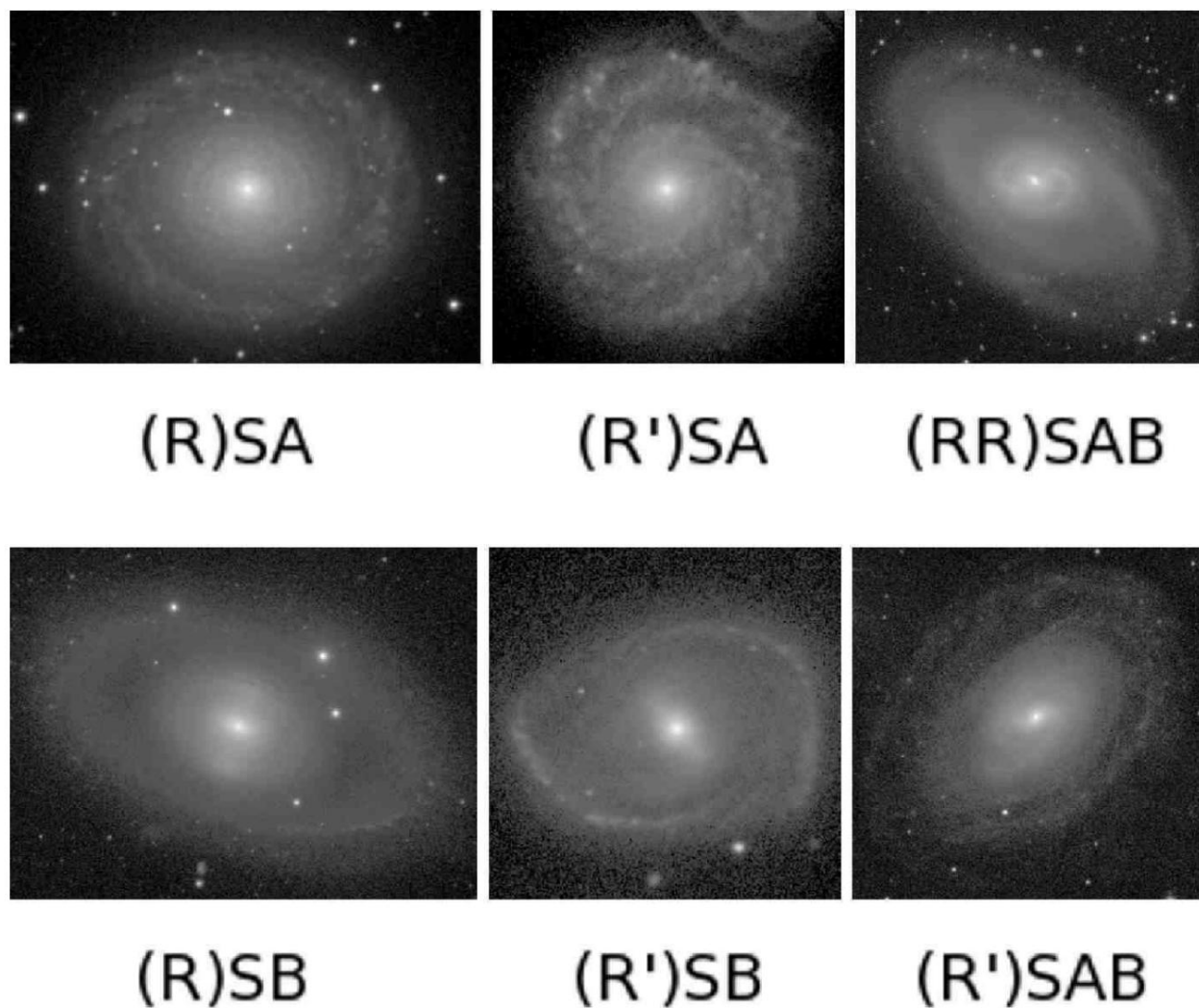
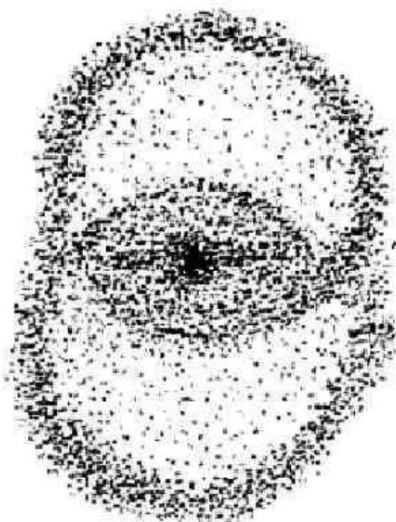
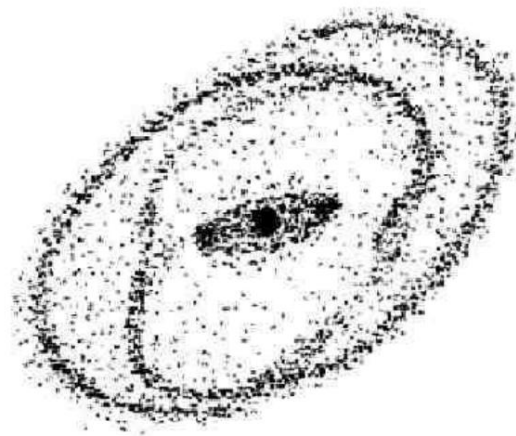


Fig. 13.— Exemples d'anneaux extérieurs (R) et de pseudo-anneaux extérieurs (R') en barrés et non barrés galaxies. Un exemple rare avec deux anneaux extérieurs (RR) largement détachés est également présenté. Les galaxies sont (de gauche à droite) : Rangée 1 – NGC 7217, IC 1993 et NGC 2273 ; Rangée 2 - NGC 3945, NGC 1358 et NGC 1371. Toutes les images proviennent du dVA et sont en bande B sauf pour NGC 2273, qui est la bande R.

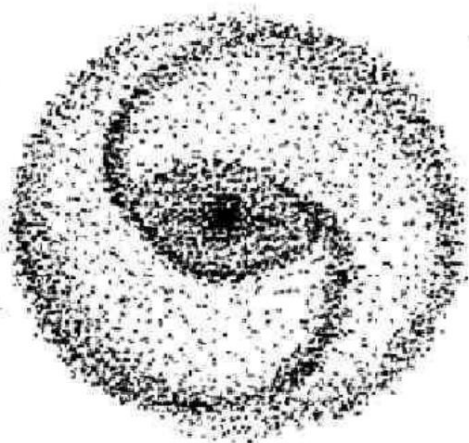
– 131 –



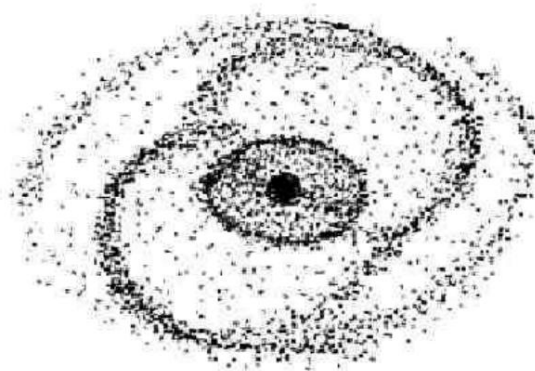
NGC 2665 R_1'



ESO 509-98 $R_1 R_2'$



ESO 325-28 R_2'



ESO 507-16 $R_1 R_2'$

Fig. 14.— représentations schématiques des morphologies de résonance externe de Lindblad (OLR) (Buta & Combes 1996).

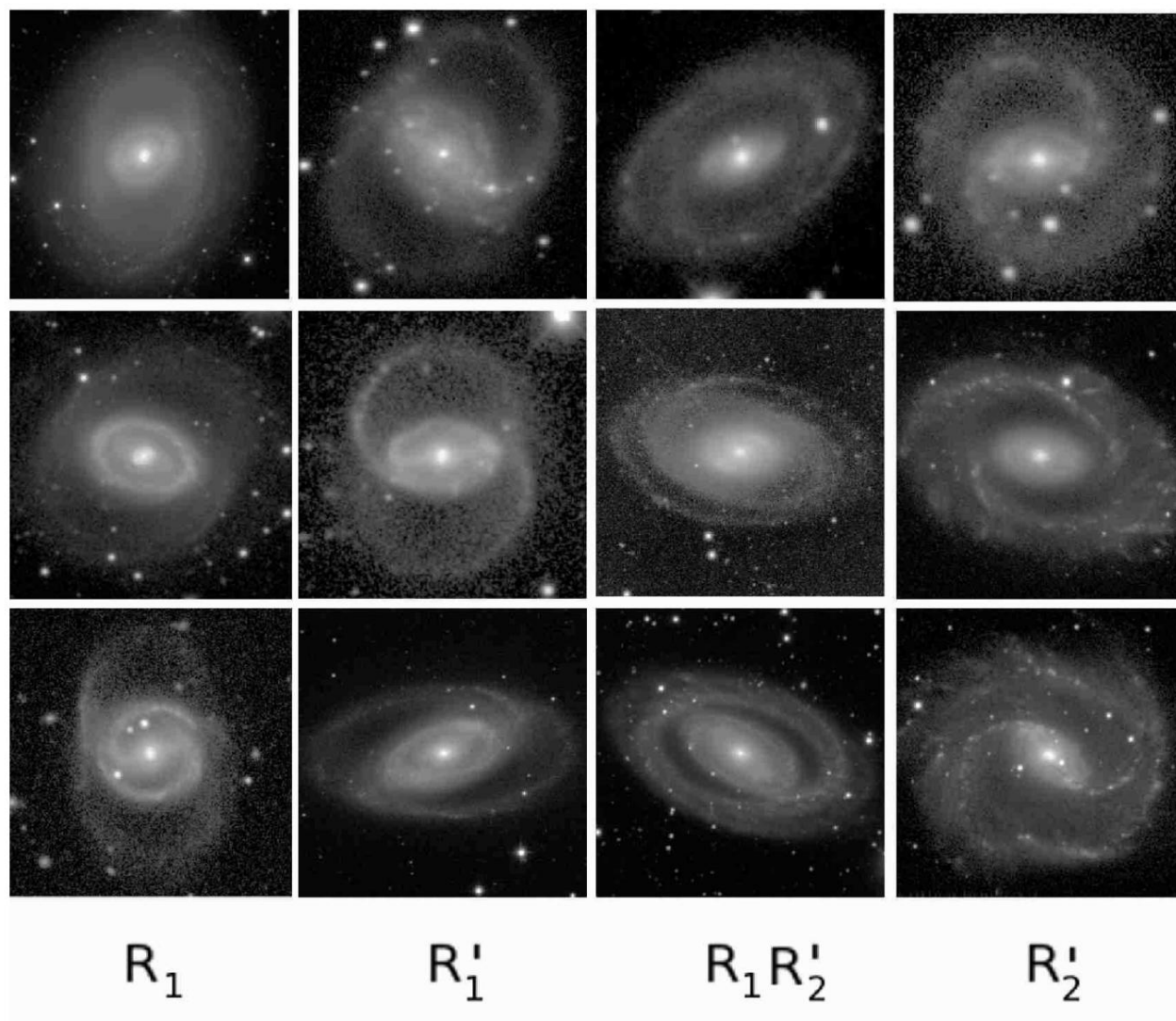


Fig. 15.— Exemples de sous-classes OLR d'anneaux extérieurs et de pseudo-anneaux. Les galaxies sont (de gauche à droite) : Rangée 1 - NGC 1326, NGC 2665, ESO 509-98 et ESO 325-28 ; Rangée 2 - NGC 3081, UGC 12646, NGC 1079 et NGC 210 ; Rangée 3 - NGC 5945, 1350, 7098 et 2935. Toutes les images sont en bande B du dVA.

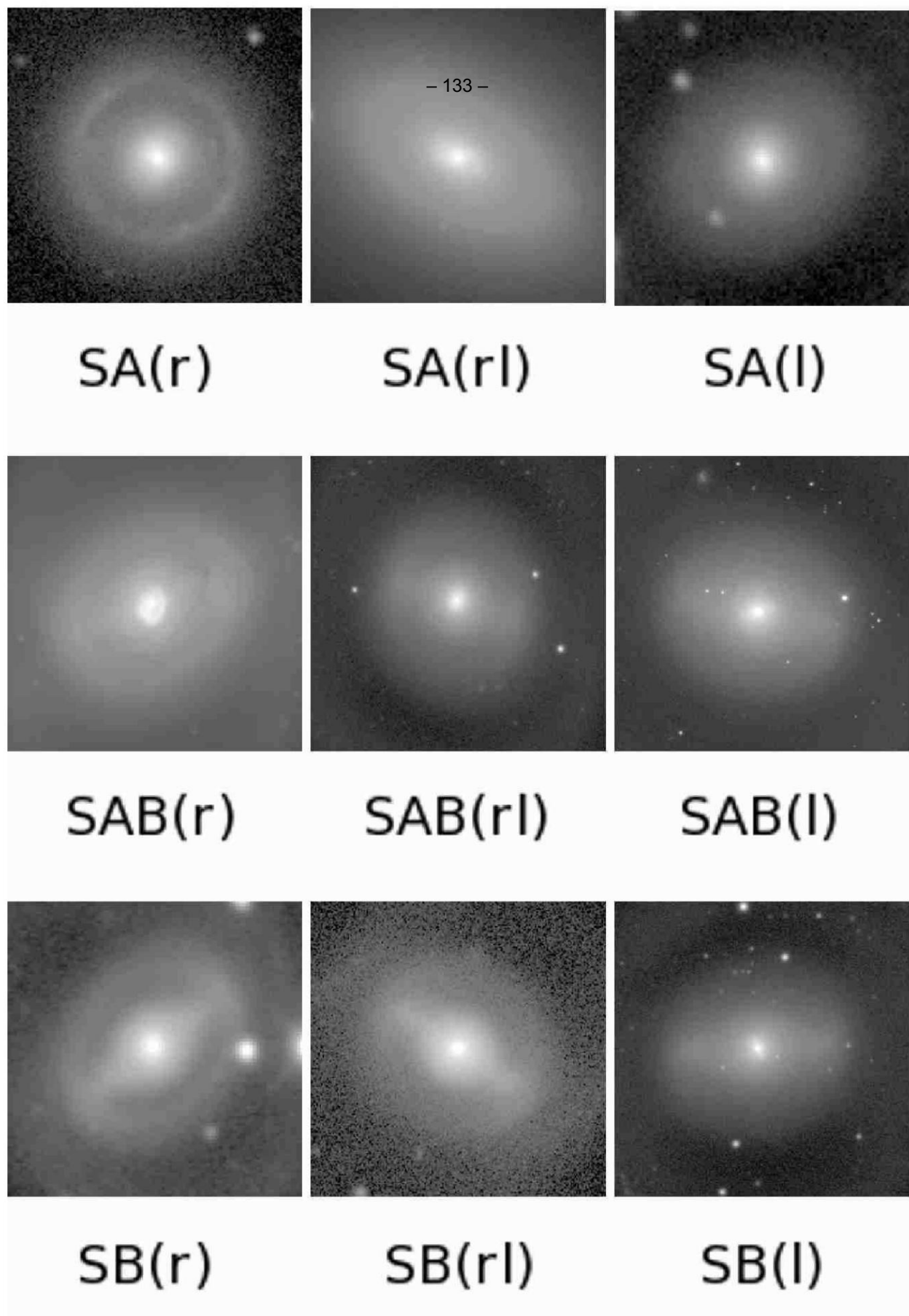


Figure 16.—

Fig. 16. suite.— Exemples montrant la continuité des bagues intérieures (r) et des lentilles (l), pour les barres et les galaxies non barrées. Les galaxies sont (de gauche à droite) : Rangée 1 – NGC 7187, 1553 et 4909 ; Rangée 2 : NGC 1326, 2859 et 1291 ; Rangée 3 - ESO 426–2, NGC 1211, NGC 1543. Toutes les images sont des bandes B ou G du dVA.

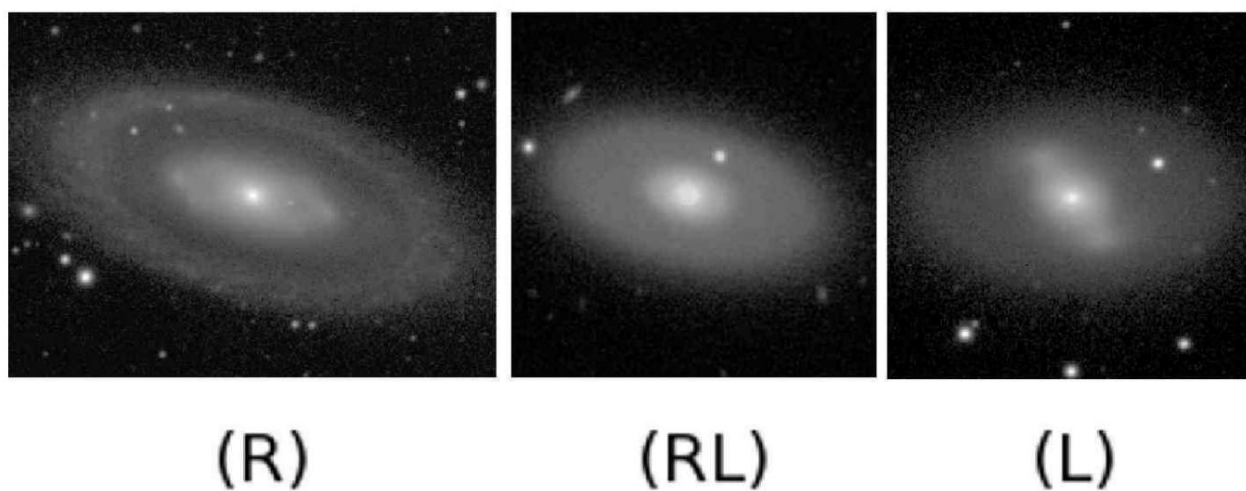
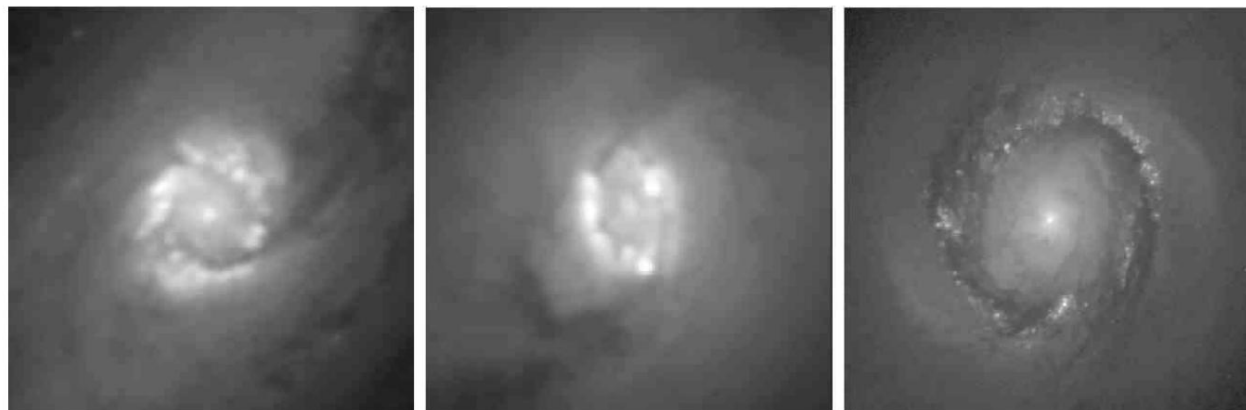
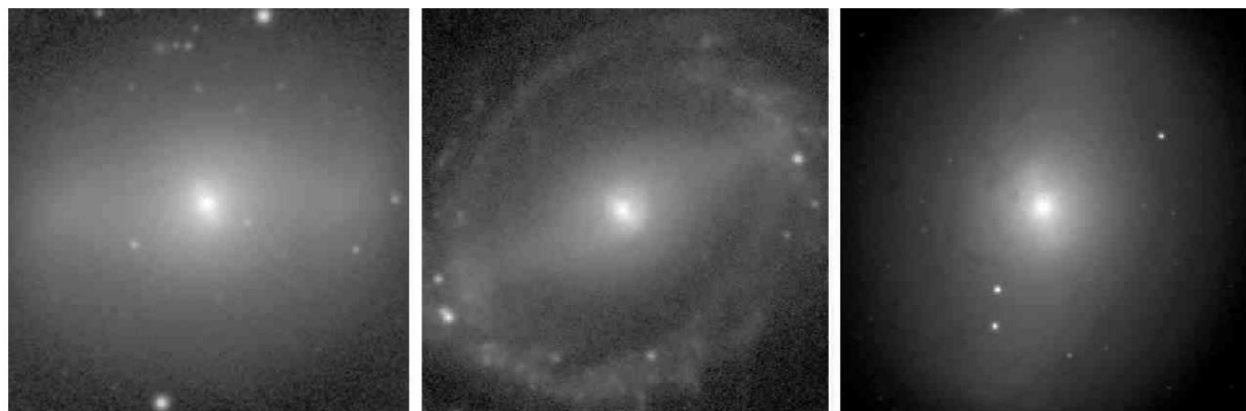


Fig. 17.— Exemples montrant la continuité des anneaux extérieurs (R) et des lentilles (L). Les galaxies sont (de gauche à droite) : - NGC 7020 (dVA B), NGC 5602 (image SDSS) et 2983 (dVA B).



nuclear rings (nr)



nuclear bars (nb)

Fig. 18.— Exemples d'anneaux nucléaires et de barres secondaires (nucléaires). Les galaxies sont (à gauche à droite) : Rangée 1 – NGC 1097, 3351 et 4314 ; Rangée 2 - NGC 1543, 5850 et 1291. Toutes les images sont en bande B du dVA.

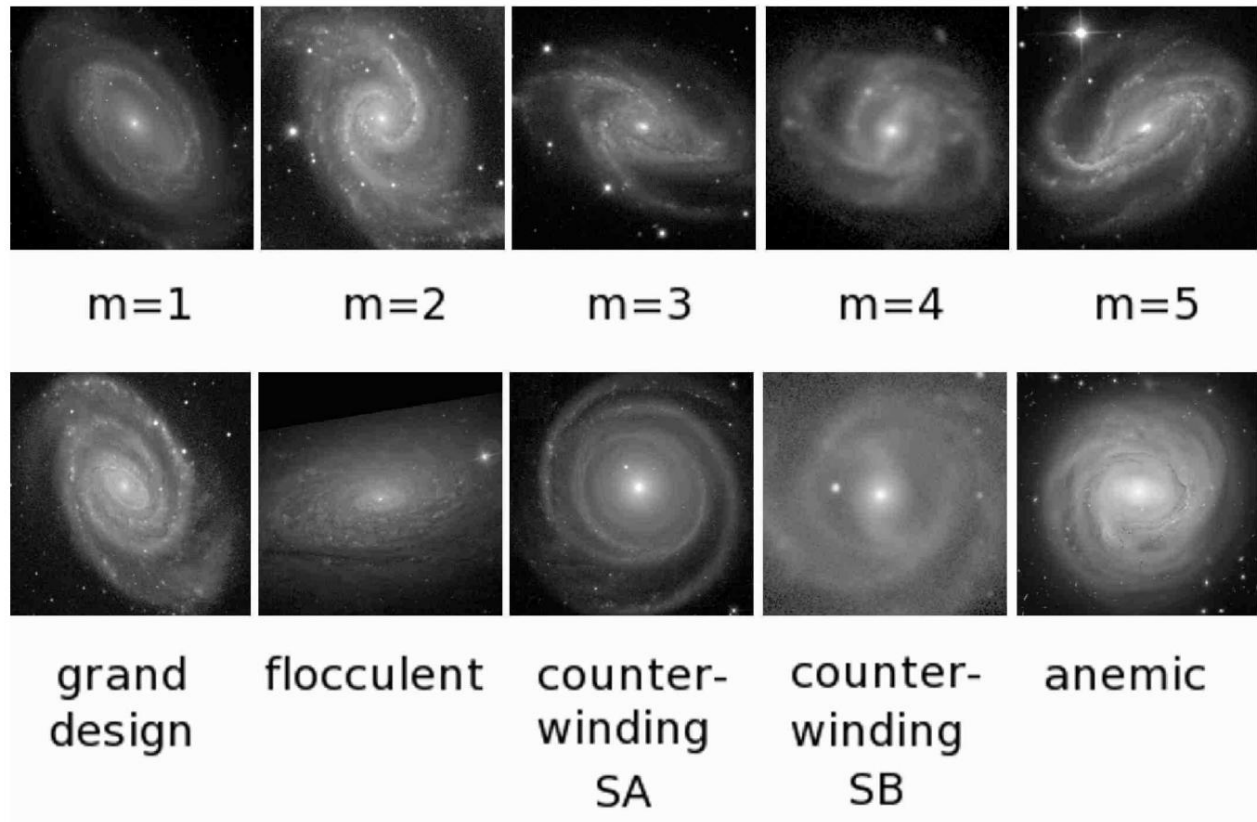


Fig. 19.— Exemples montrant les différences de caractères des bras en spirale sous forme de multiplicité des bras, un grand dessein et des spirales flocculantes, des spirales à contre-enroulement et une spirale anémique. Les galaxies sont (de gauche à droite) : Rangée 1 – NGC 4725, 1566, 5054, ESO 566–24 et NGC 613 ; Rangée 2 - NGC 5364, 5055, 4622, 3124 et 4921. Toutes les images sont en bande B du dVA, sauf NGC 5055, qui est la bande g SDSS, et NGC 4921, qui provient de Hubble Heritage.

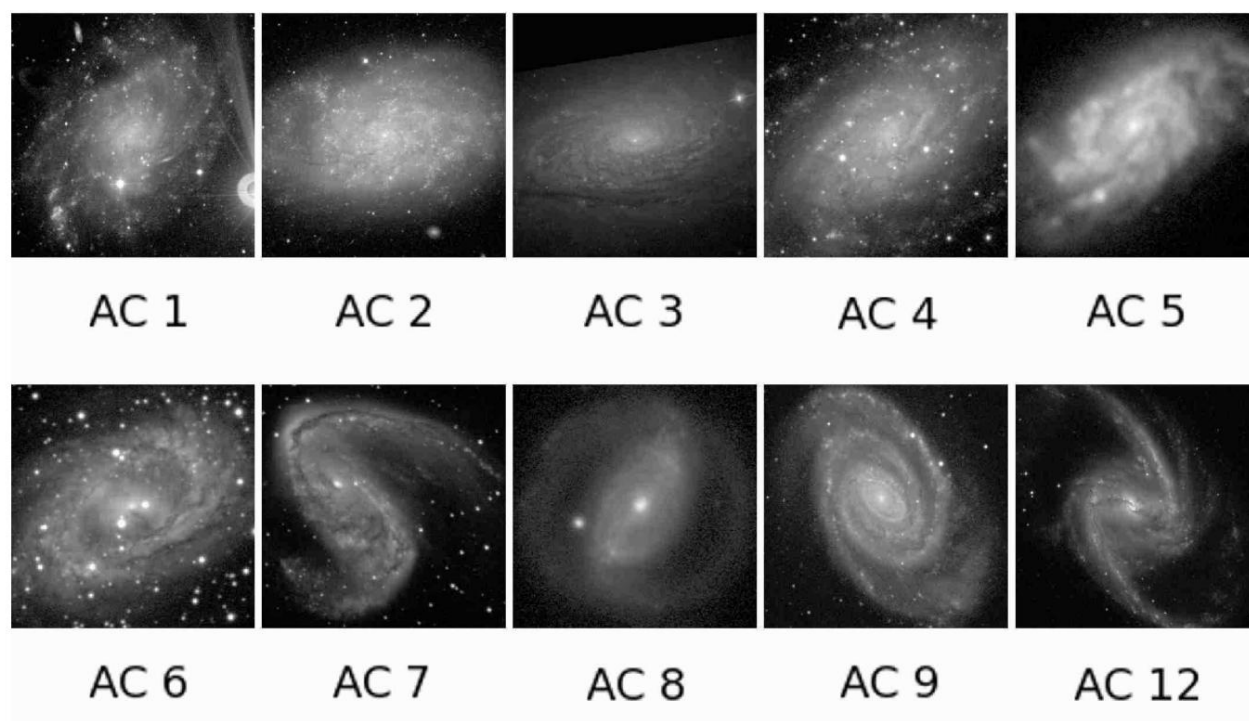


Fig. 20.— Exemples montrant les classes de bras spiraux d'Elmegreen & Elmegreen (1987). Le

les galaxies sont (de gauche à droite) : Rangée 1 - NGC 45, 7793, 5055, 2403 et 1084. Rangée 2 : NGC 6300,

2442, 3504, 5364 et 1365. Toutes les images sont en bande B du dVA, à l'exception de NGC 5055 qui

est la bande G SDSS.

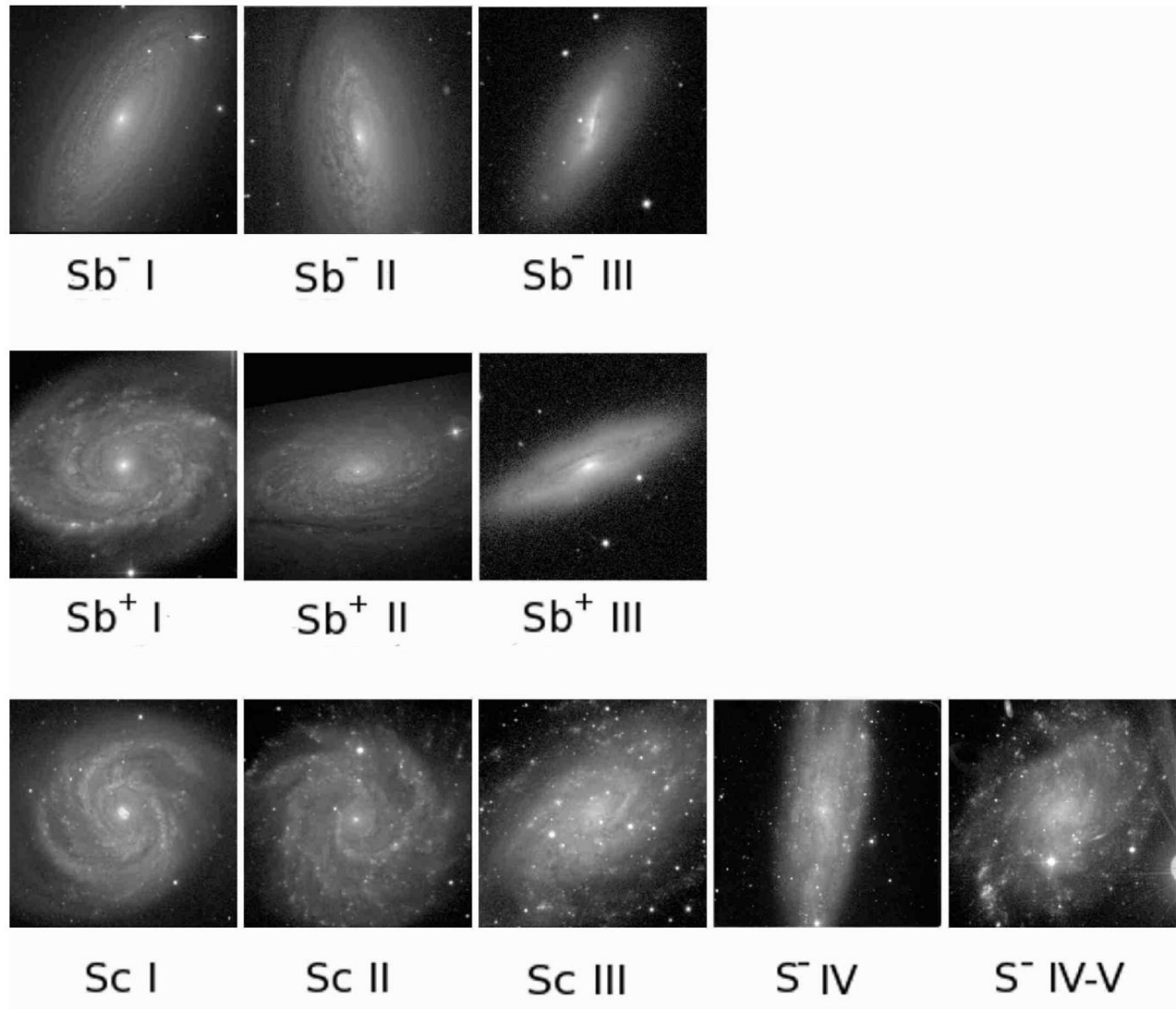


Fig. 21.— Exemples montrant les classes de luminosité de van den Bergh. Les galaxies sont (à gauche à droite) : Ligne 1 - NGC 2841 (dVA B), 3675 (SDSS g) et 4064 (SDSS g). Rangée 2 : NGC 5371 (dVA B), 5055 (SDSS g) et 4586 (SDSS g). Rangée 3 : NGC 4321, 3184, 2403, 247 et 45 (tous les dVA B). Les classifications sont dans le système van den Bergh (voir van den Bergh 1998).

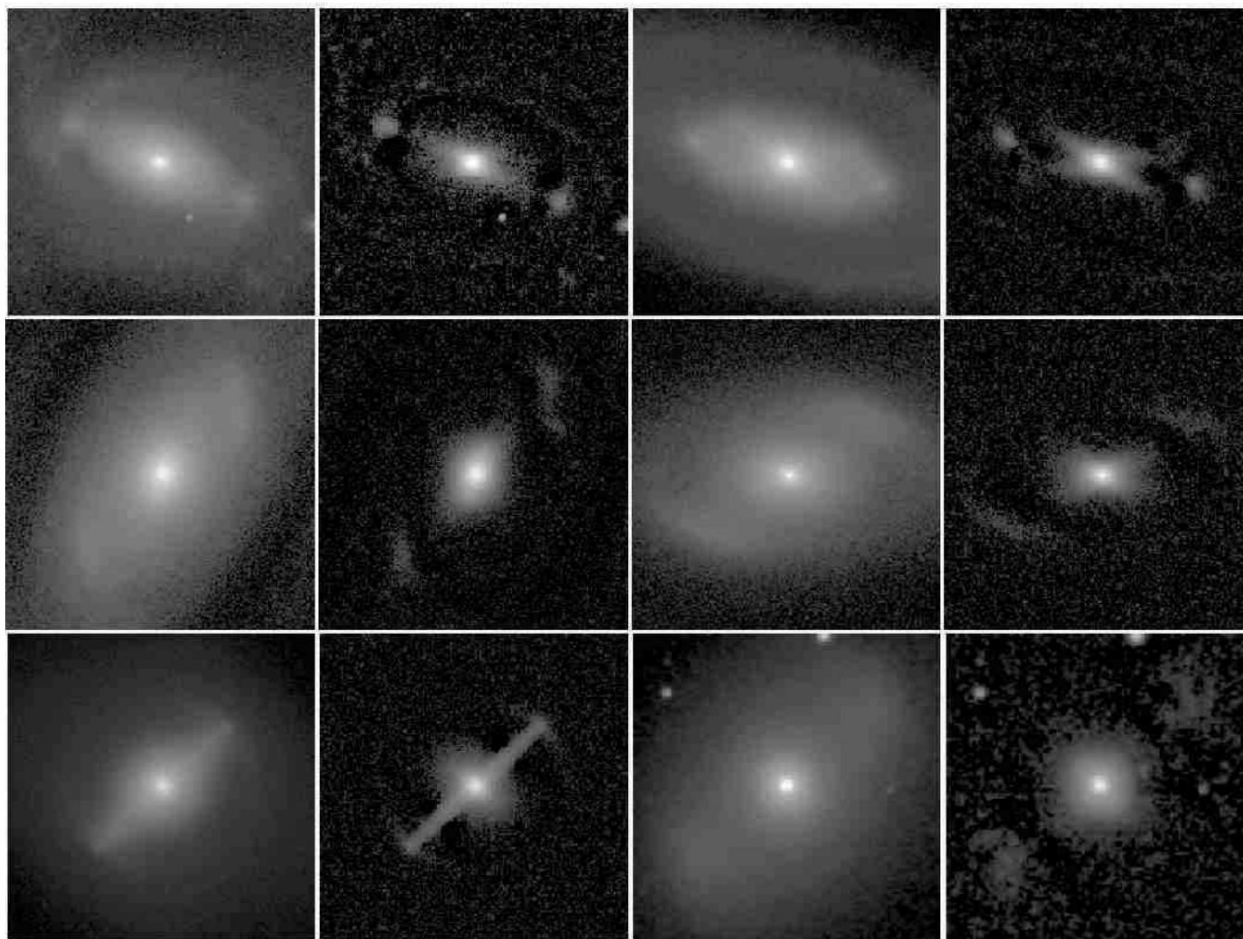


Fig. 22.— Exemples montrant les morphologies des barres d'ansae par rapport à celles d'une barre pour la plupart non-ansae bar. Pour chaque galaxie, le cadre de gauche est l'image complète tandis que le cadre de droite est une image floue. image masquée, toutes deux en unités de mag arcsec^{-2} . Les galaxies sont : (de gauche à droite) : Rangée 1 - NGC 5375 (SDSS g) et 7020 (I) (tous deux de type ansae rondes) ; Rangée 2 - NGC 7098 (I, linéaire, en partie anses ondulées) et NGC 1079 (Ks, anses courbes) ; Rangée 3 - NGC 4643 (I, principalement non-ansae type avec trace d'arcs d'anneau aux extrémités des barres) et NGC 4151 (OSUBSGS H, ansae irrégulières).

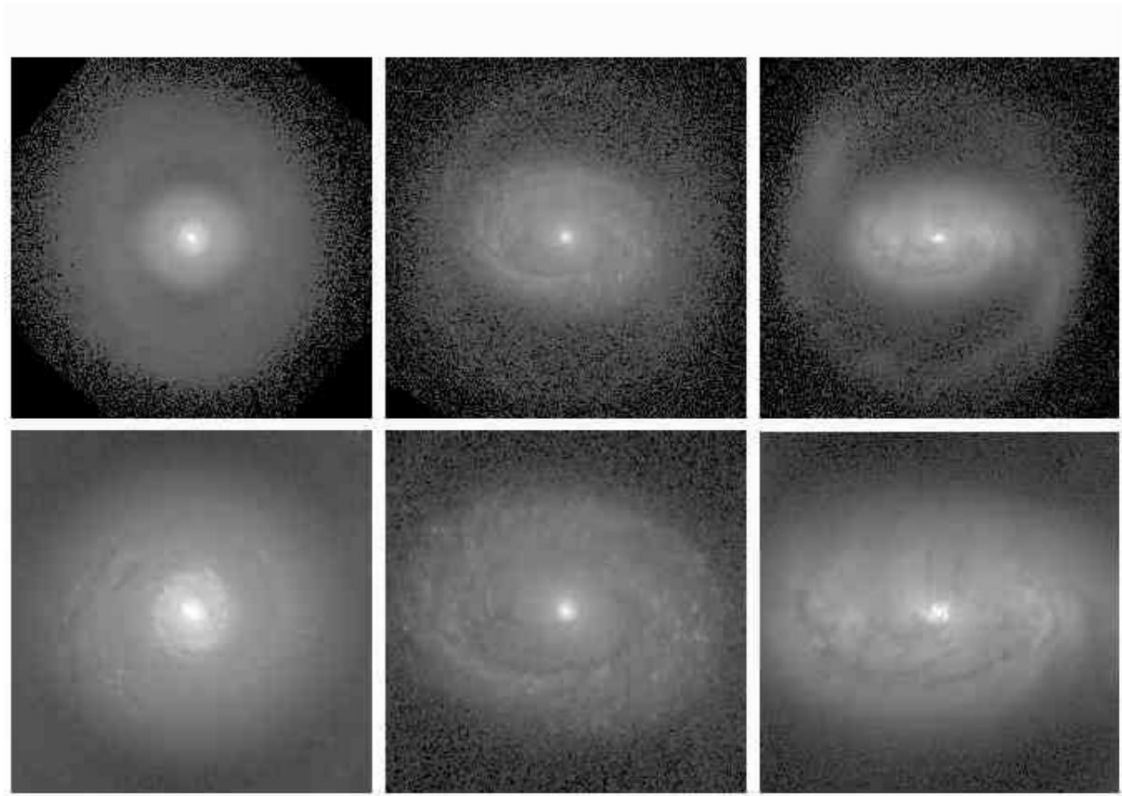


Fig. 23.— Exemples de galaxies à disque ovale. De gauche à droite : NGC 4736 (B), NGC 4941 (B), et NGC 1808 (V). Les images sont débarrassées des objets de premier plan et d'arrière-plan et ont été déprojetées et tournées de manière à ce que le grand axe de l'ovale soit horizontal. La partie supérieure des panneaux montre les ovales intégrés dans les anneaux extérieurs, tandis que les panneaux inférieurs se concentrent sur les ovales seuls.

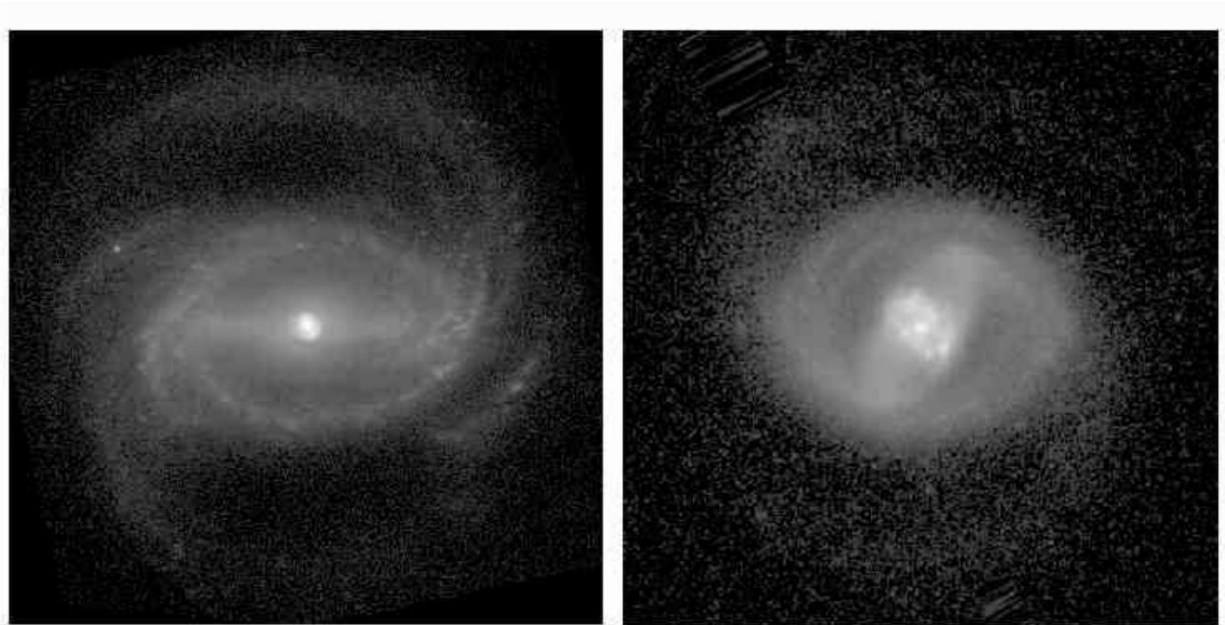


Fig. 24.— Exemples de deux galaxies ayant un anneau intérieur très allongé à la limite de un large ovale. De gauche à droite : NGC 1433, ESO 565–11 (tous deux en bande B). Chaque galaxie possède également une barre proéminente alignée avec l'ovale et l'anneau intérieur de NGC 1433, mais mal alignée avec ces fonctionnalités dans ESO 565–11. ESO 565–11 possède également un grand noyau nucléaire très allongé anneau de régions de formation d'étoiles.

– 143 –

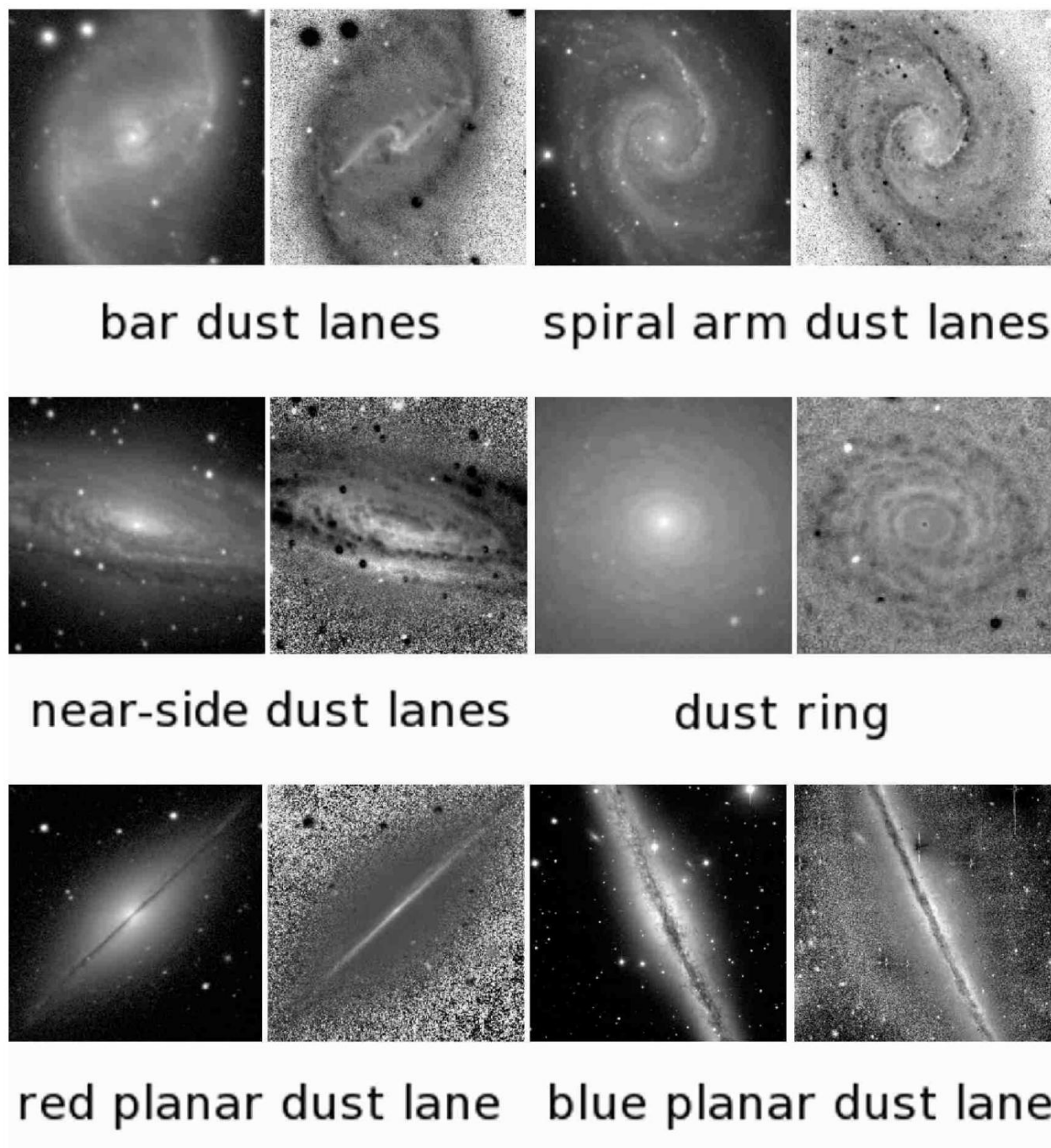


Fig. 25.— Exemples montrant différentes classes de bandes de poussière (de gauche à droite) - Rangée 1 NGC 1530, Image en bande V et carte d'index de couleurs $V - K_s$; NGC 1566, bande B et indice de couleur $B - K_s$ carte; Rangée 2 - NGC 7331, image en bande B et carte d'index de couleurs $B - I$; NGC 7217, bande B image et carte d'index de couleurs $B - I$; Rangée 3 - NGC 7814, image en bande B et indice de couleur $B - I$ carte; NGC 891, carte d'index de couleurs en bande B et $B - V$.

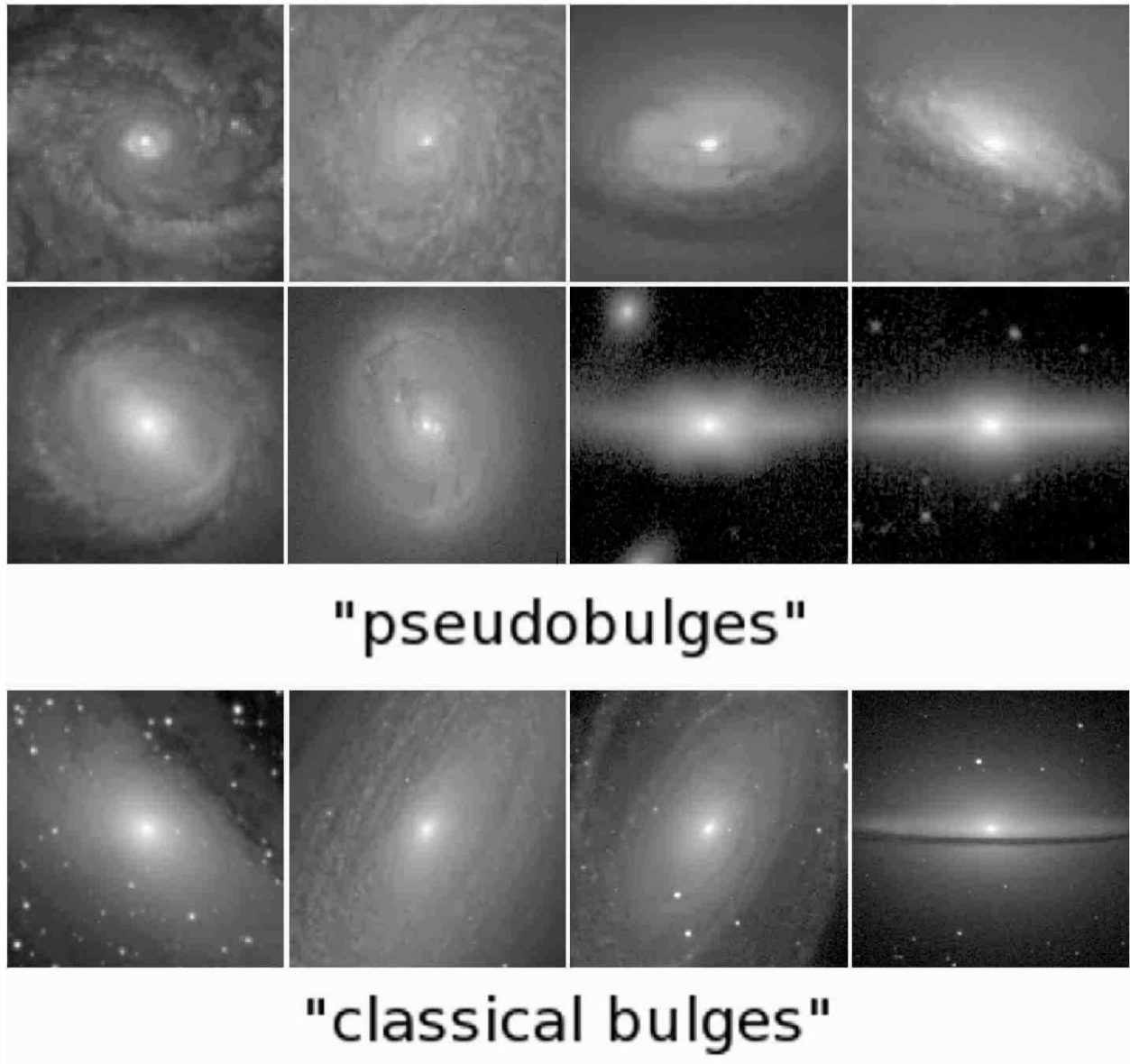


Fig. 26.— Exemples de pseudobulges et de renflements classiques dans les galaxies spirales (de gauche à droite) :

Rangée 1 : NGC 3177, 4030, 5377 et 1353 (tous les filtres à large bande V HST F606W ; KK04) ; Rangée

2 : NGC 6782 (bande I, F814W), 3081 (large B, F450W), 128 (Ks) et 1381 (Ks) ; Ligne 3 :

NGC 224 (M31), 2841, 3031 (M81) et 4594 (M104) (tous en bande B). Les images de NGC 128

et 1 381 proviennent de Bureau et al. (2006).

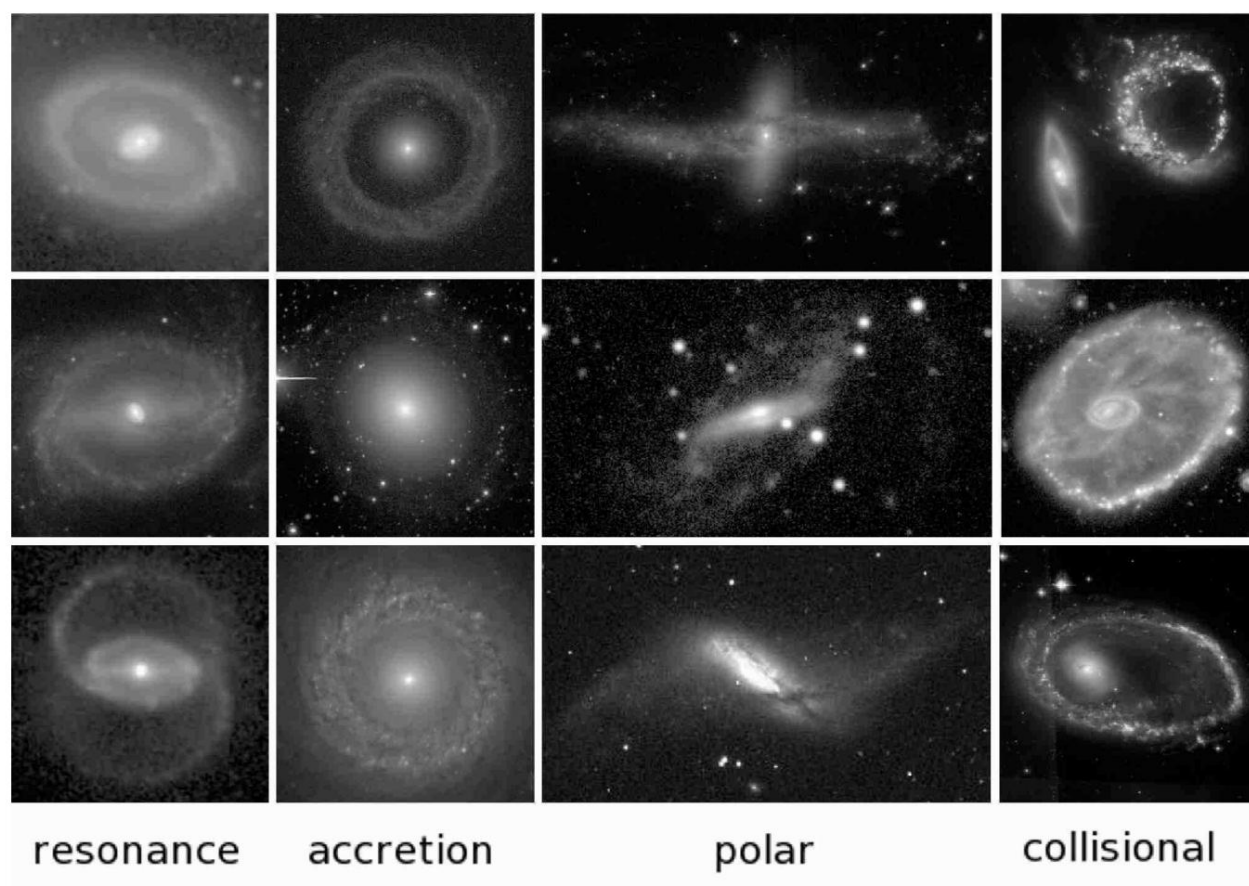


Fig. 27.— Différentes classes de phénomènes d'anneaux observés dans les galaxies (de haut en bas) : Colonne 1 - NGC 3081, NGC 1433 et UGC 12646. Colonne 2 – Objet de Hoag, IC 2006 et NGC 7742 ; Colonne 3 : NGC 4650A, ESO 235–58 et NGC 660 ; Colonne 4 - Arp 147, la Roue, et la bague Lindsay-Shapley. Toutes les images proviennent du dVA sauf Arp 147.

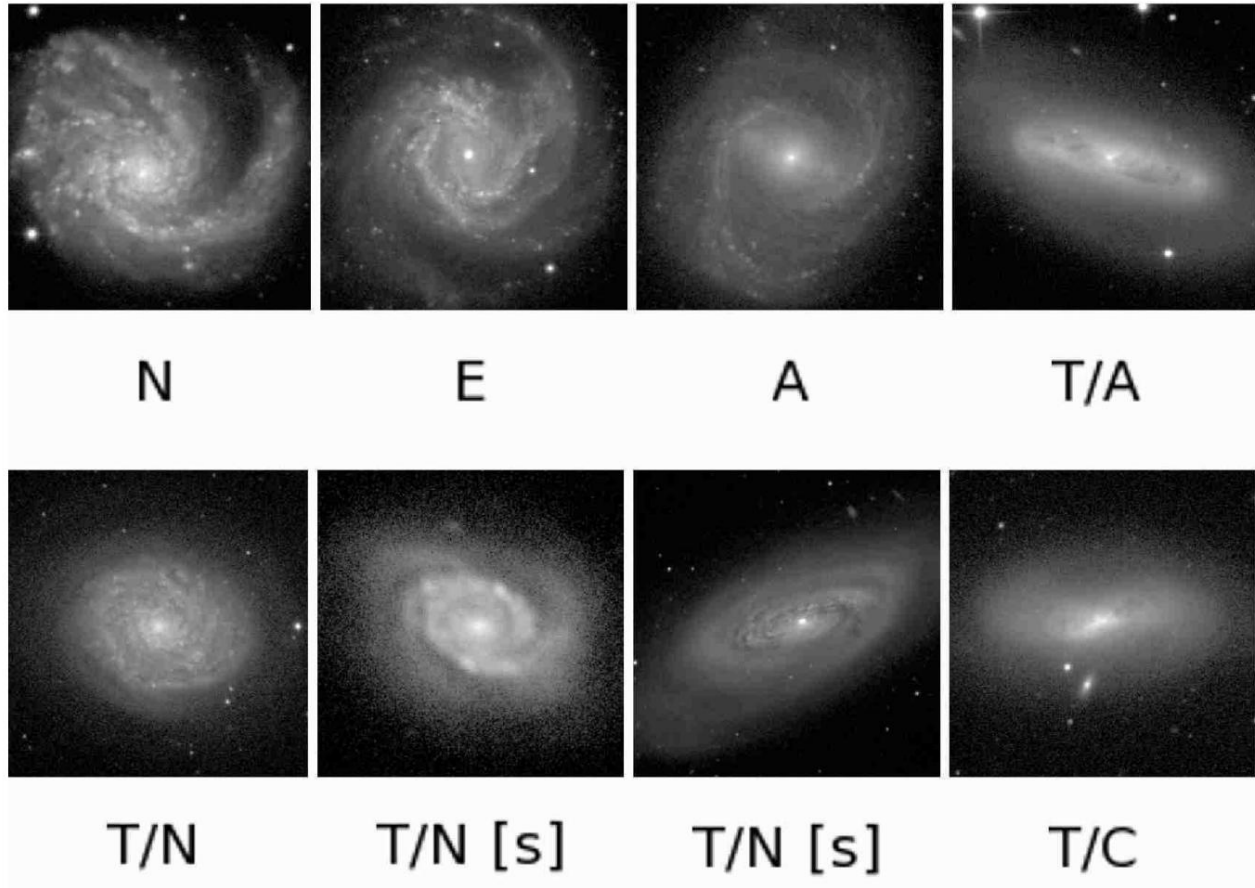
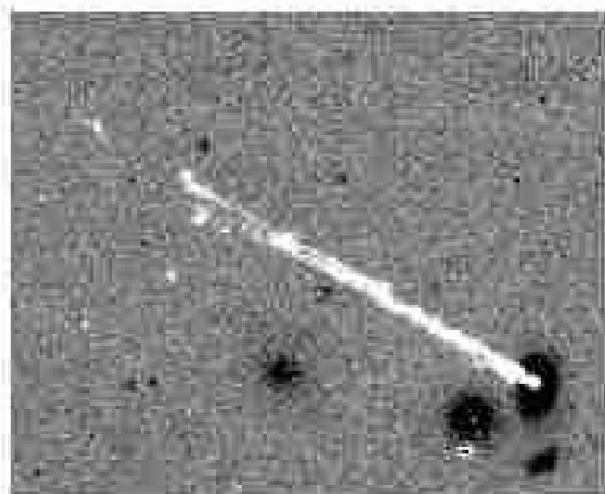


Fig. 28.— Morphologies de lumière bleue de huit spirales de l'amas de la Vierge ayant différents Koopmann & Kenney (2004) Morphologies de formation d'étoiles H α . Les galaxies sont (de gauche à droite) : Row 1 : NGC 4254 (normale N) ; NGC 4303 (E amélioré); NGC 4548 (anémique A); NGC 4293 (T/A tronqué/anémique) ; Ligne 2 : NGC 4689 (Tronqué/Normal T/N) ; NGC 4580 et 4569 (Tronqué/Normal (sévère) T/N [s]) ; NGC 4424 (T/C tronqué/compact). Images sont d'VA B, sauf pour NGC 4424 qui est SDSS g.

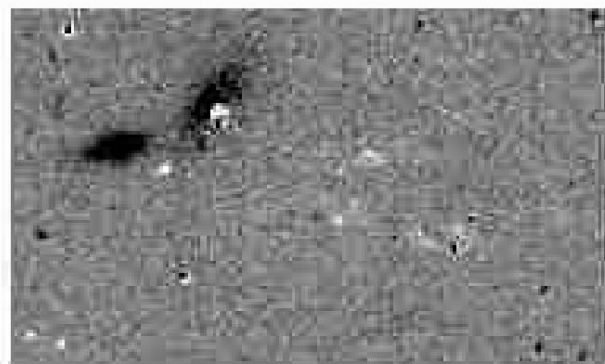
– 147 –



connected H-alpha clouds with disk star formation



connected H-alpha clouds without disk star formation



detached H-alpha clouds

Fig. 29. (suite).— Trois galaxies dans une possible séquence évolutive de décapage dans le Coma Grappe. Les images et les catégories proviennent de Yagi et al. (2010). Les cadres de gauche sont en bande B images en unités de mag arcsec^{-2} , tandis que les images de droite sont des images H α nettes en intensité linéaire unités (appelées NB-R par Yagi et al.). De haut en bas, les galaxies sont GMP 3816, GMP 2910 et GMP 2923. L'idée est que GMP 3816 est dans une phase antérieure de décapage, comme qu'il existe encore une quantité considérable de gaz ionisé sur disque ; GMP 2910 est dans une phase plus avancée avec des nuages toujours connectés mais une absence d'émission de disque ; et enfin GMP 2923 est dans le plus phase avancée des trois, ne montrant que des régions HII dispersées.

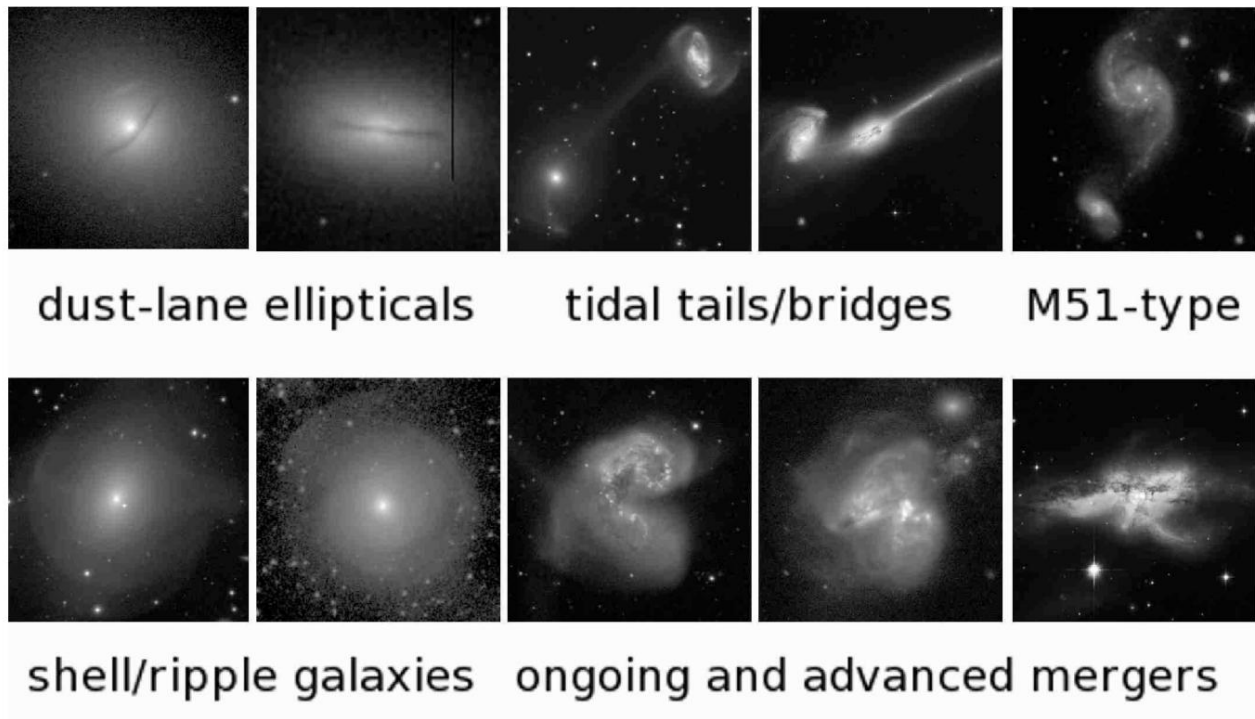


Fig. 30.— Galaxies en interaction et particulières. Les galaxies sont (de gauche à droite) : Rangée 1 : NGC 5485 (SDSS), 4370 (SDSS), 5216/18 (A. Block), 4676 (Hubble Heritage) et 2535-6 (SDSS) ; Rangée 2 : NGC 2865, 474, 4038-9, 3690 et 6240, tous B sauf NGC 474, qui est un 3,6 μm image (article 12).

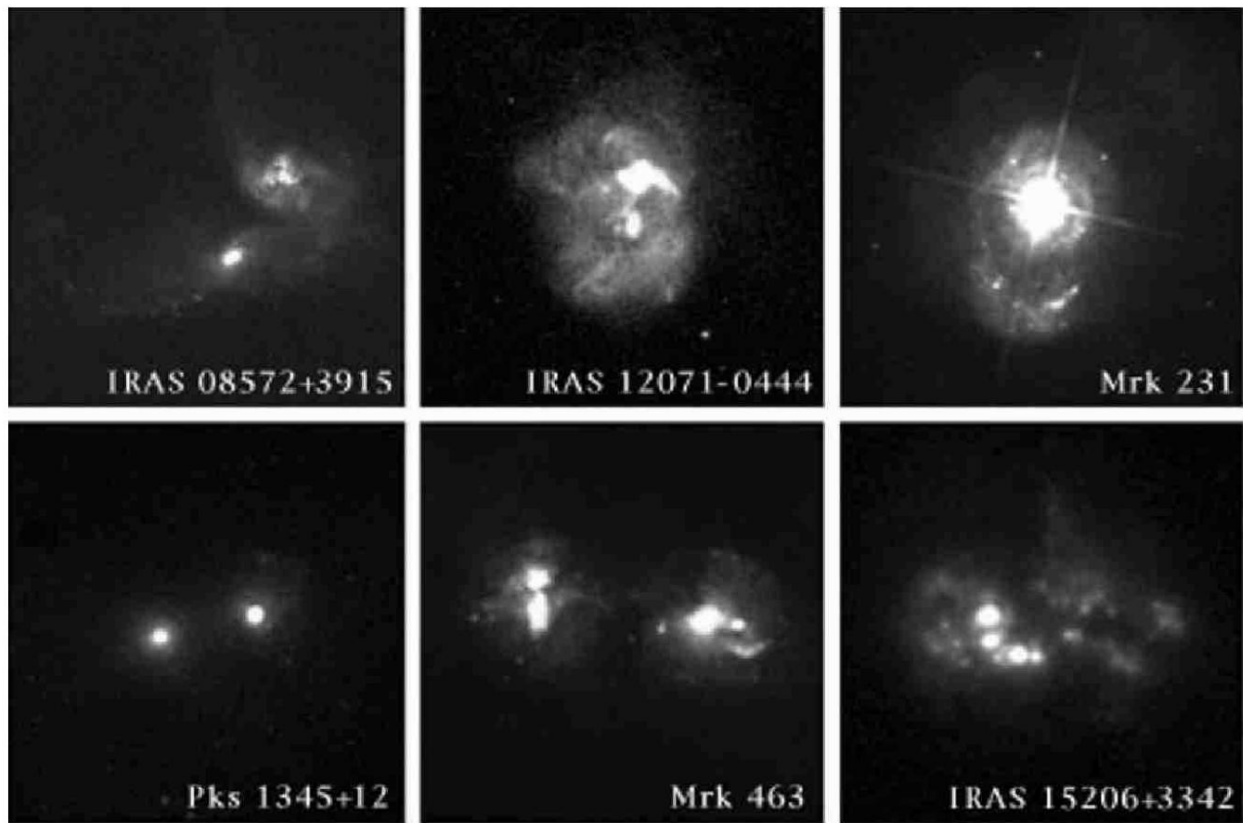


Fig. 31.— Les morphologies de six « galaxies infrarouges ultra-lumineuses » de HST imagerie optique/proche IR (Surace et al. 1998). Ces images ne sont pas en unités de mag arcsec^{-2} .



Fig. 32.— Trois galaxies présentant une forte déformation du disque optique. De gauche à droite : NGC 4762 (B), NGC 4452 (SDSS), UGC 3697 (Internet Encyclopédie de la Science)

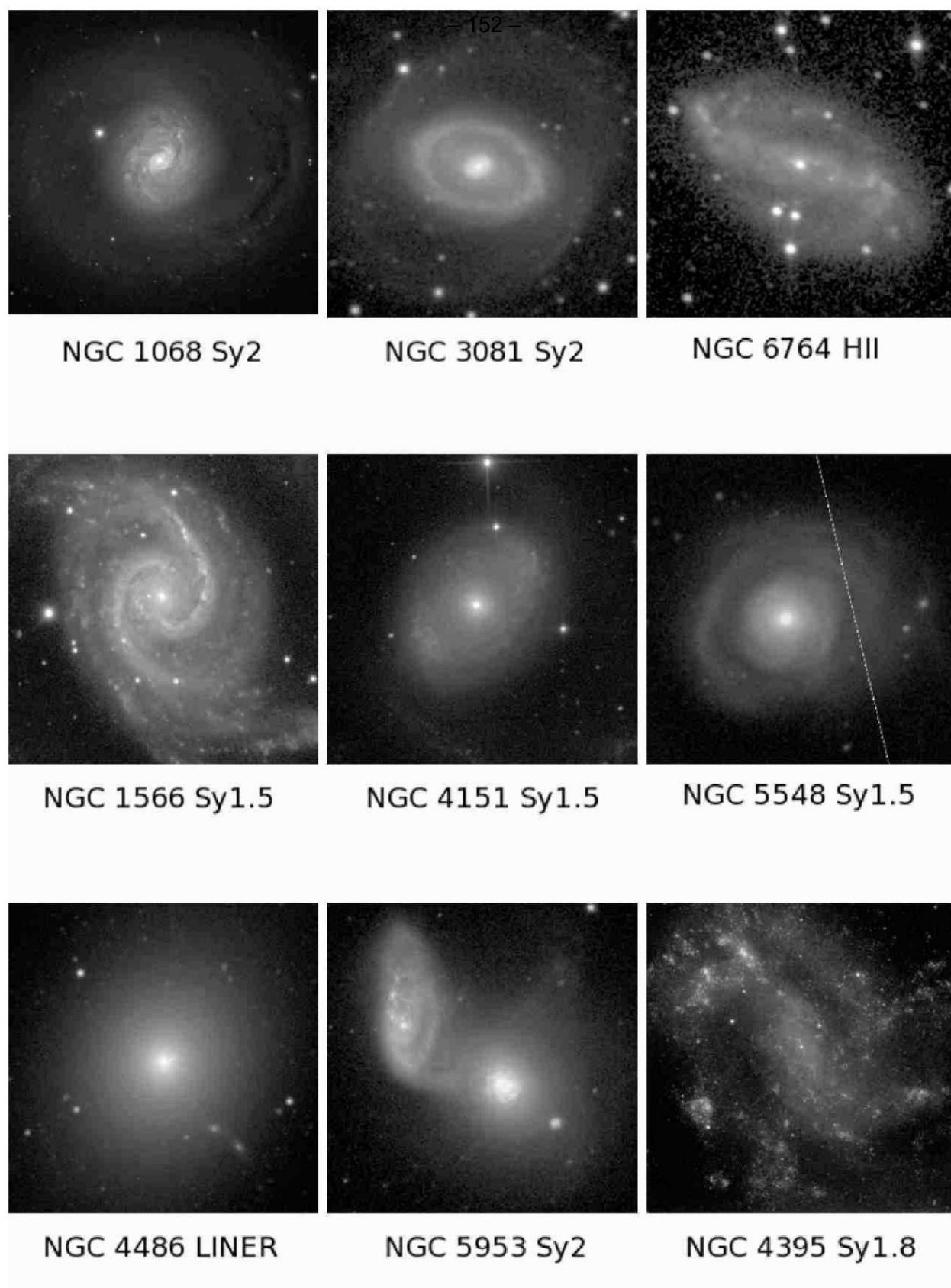


Fig. 33.— Images de galaxies actives proches, bande B dVA sauf NGC 5548 et 5953, qui sont SDSS. La classification des activités est tirée de Veron-Cetty & Veron (2006).

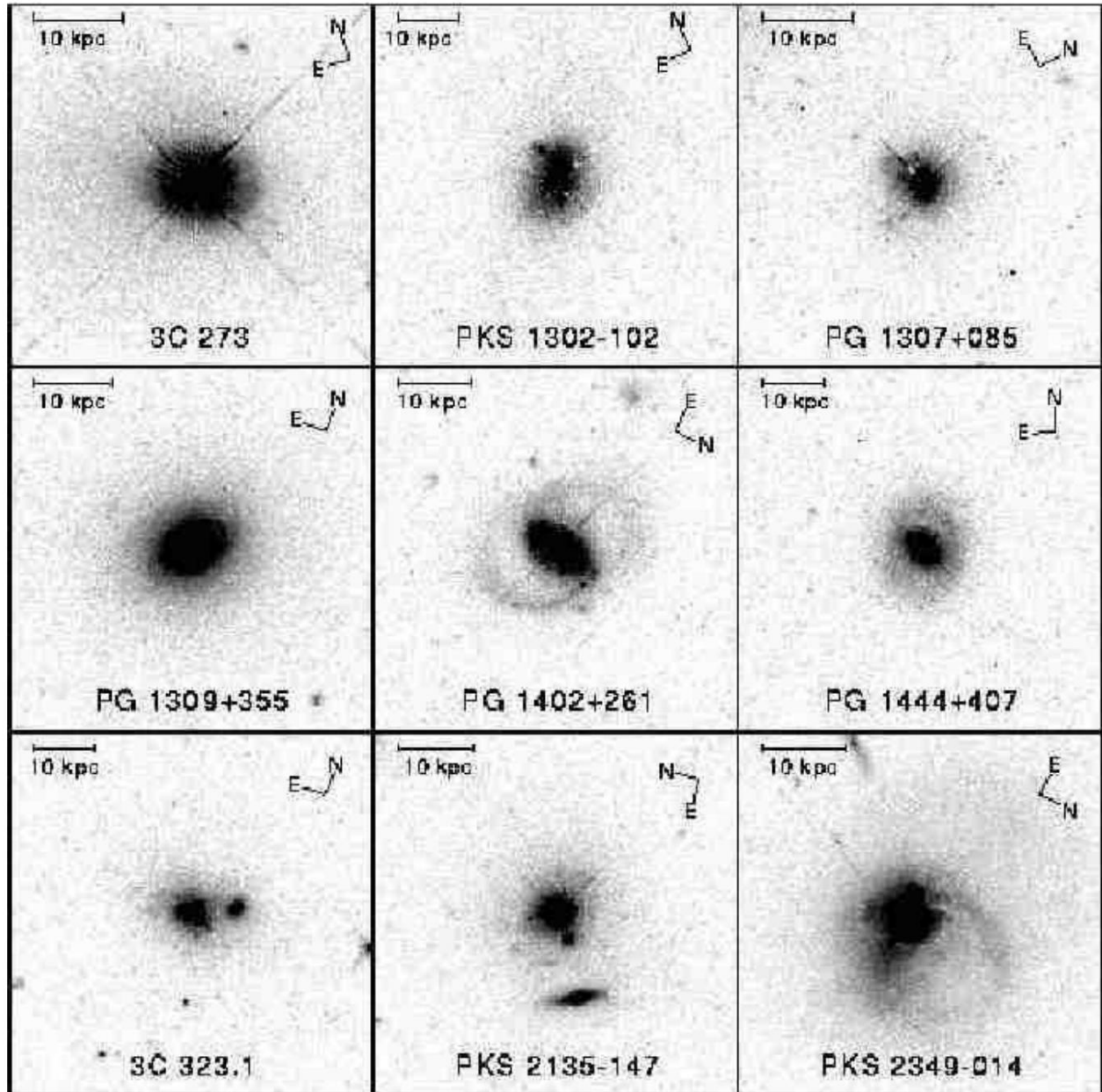


Fig. 34.— Les morphologies des galaxies hôtes de neuf quasars proches, d'après Bahcall et al. (1997). Ces images ne sont pas en unités de mag arcsec^{-2} .

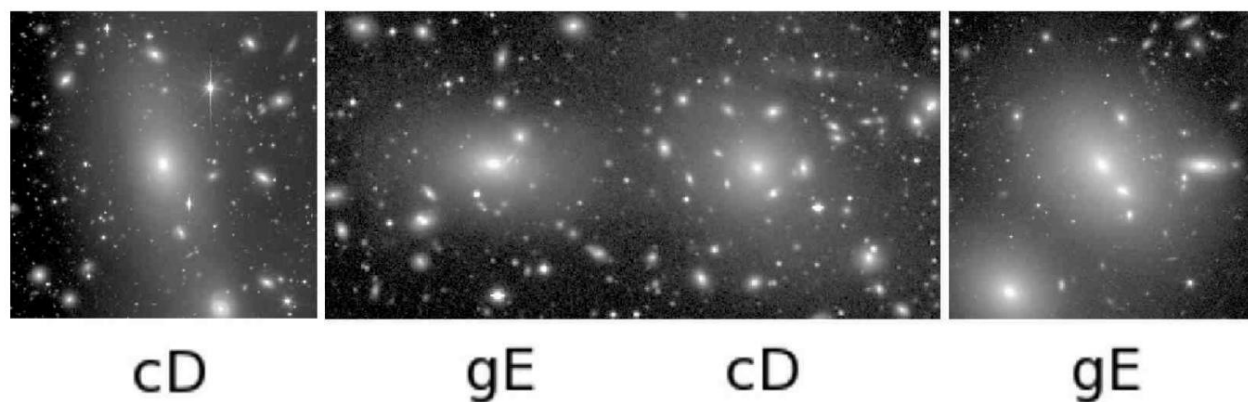


Fig. 35.— Images profondes des membres les plus brillants de trois riches amas de galaxies (de gauche à droite) : UGC 10143 en A2152 (bande R), NGC 4889 (à gauche) et 4874 (à droite) en A1656 (bande B), et NGC 6041 (bande R) en A2151. Les images de UGC 10143 et NGC 6041 proviennent de Blakeslee (1999), tandis que celle de NGC 4874-89 provient du dVA.

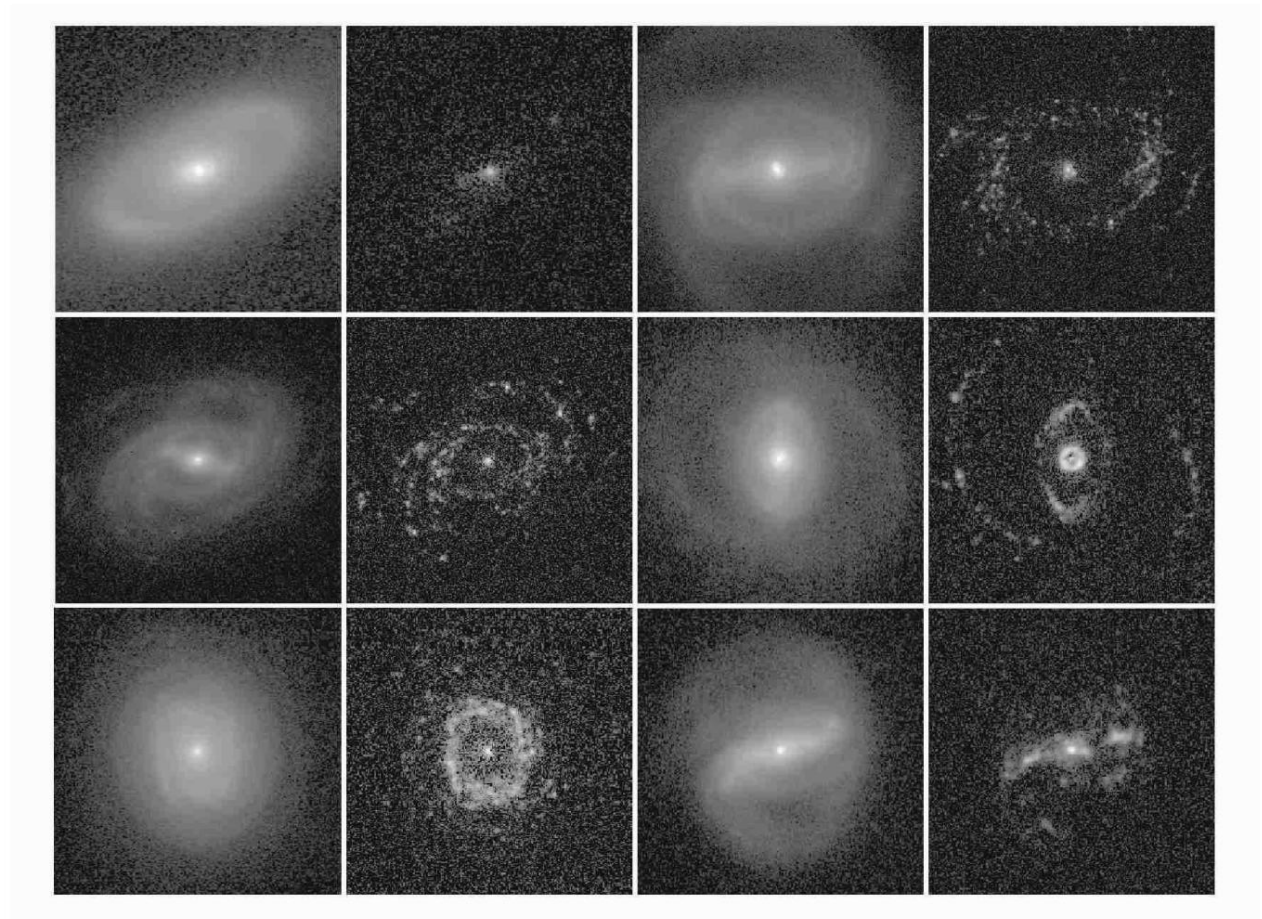


Fig. 36.— Images du continuum rouge (à gauche) et du réseau H α (à droite) de six types précoces à intermédiaires galaxies. Les galaxies sont (de gauche à droite) : rangée du haut : NGC 7702, 1433 ; rangée du milieu : NGC 7329, 6782 ; rangée du bas : NGC 6935, 7267. D'après Crocker, Baugus et Buta (1996).

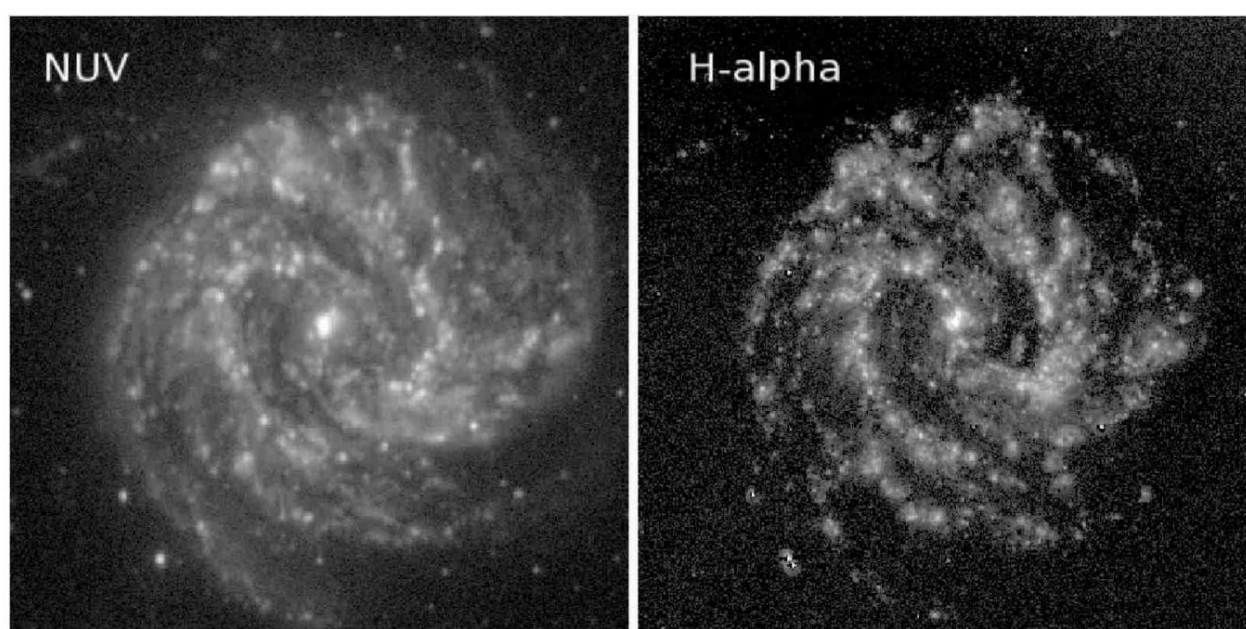


Fig. 37.— Comparaison d'une image proche UV (0,225 μm) avec une image H α pour le proche galaxie spirale M83.

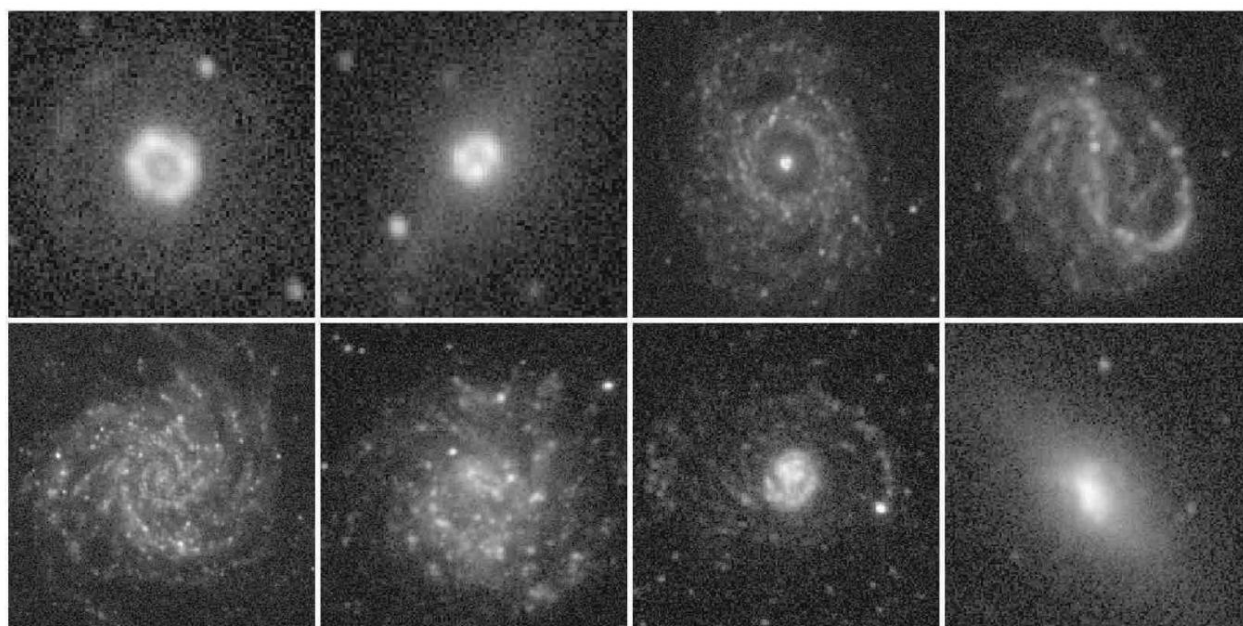


Fig. 38.— Images GALEX proche UV de huit galaxies : (de gauche à droite) Rangée supérieure : NGC 1317, 4314, 3351 et 7479 ; rangée du bas : NGC 628, 5474, 4625 et 5253

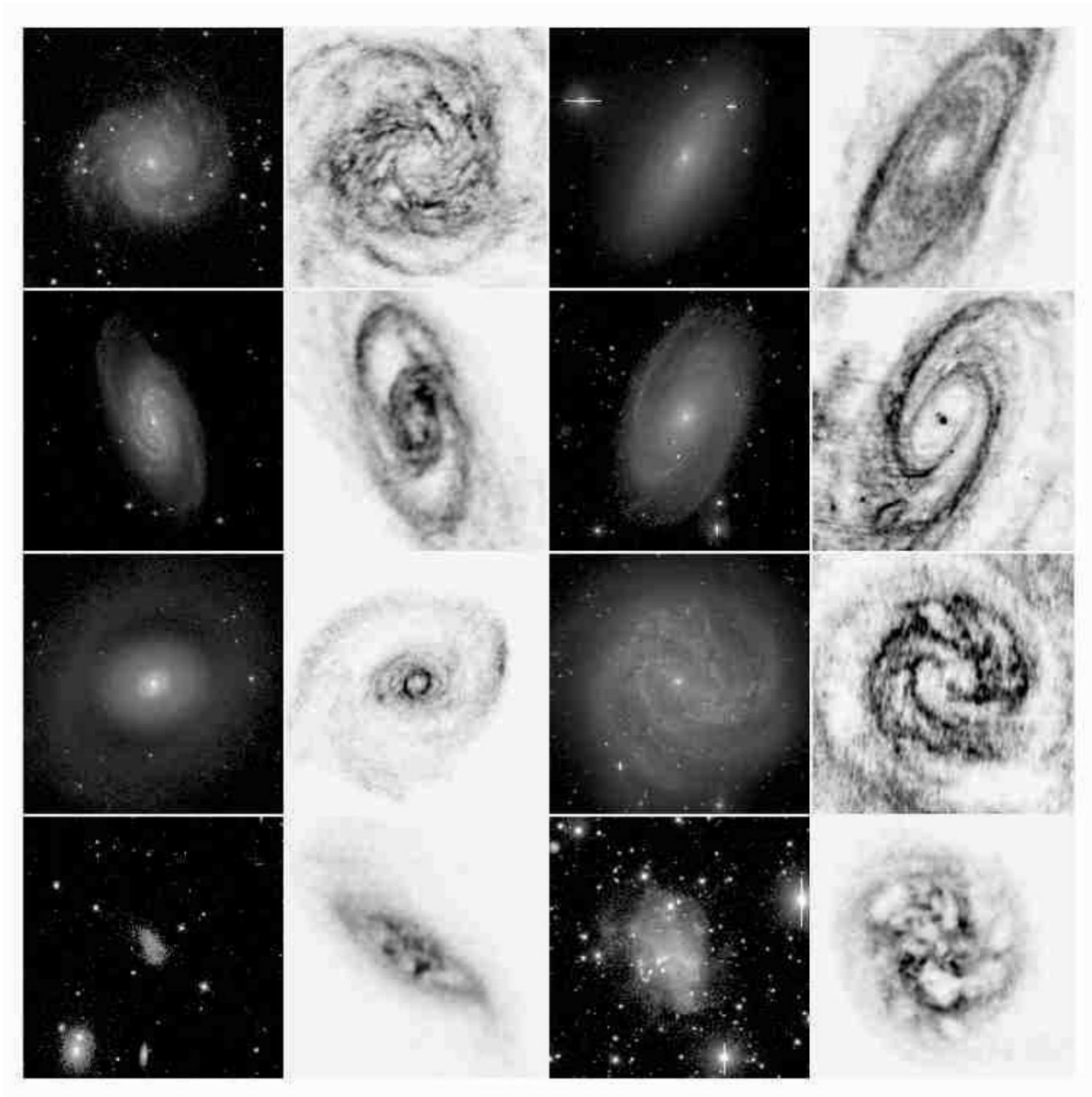


Fig. 39.— Morphologies HI (Walter et al. 2008) de huit galaxies par rapport aux morphologies optiques Morphologies de la bande B. Panneaux de gauche : NGC 628 (M74), NGC 4258 (M106), NGC 4736 (M94), et DDO 154. Panneaux de droite : NGC 2841, NGC 3031 (M81) ; NGC 5236 (M83) et DDO 50 (Ho II).

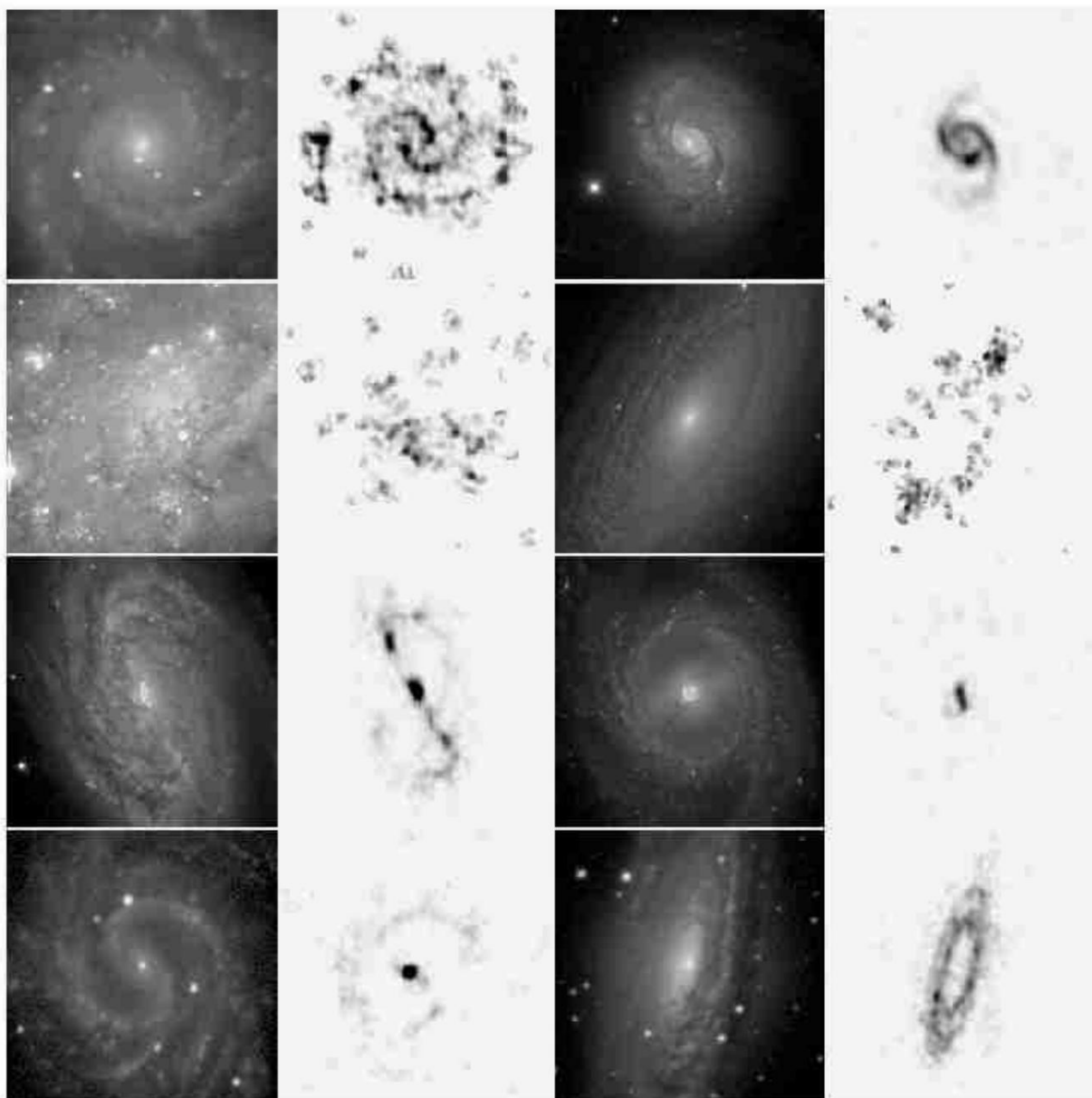


Fig. 40.— Morphologies du CO (Helfer et al. 2003) de huit galaxies par rapport aux Morphologies de la bande B. Panneaux de gauche : NGC 628 (M74), NGC 2403, NGC 2903 et NGC 4535. Panneaux de droite : NGC 1068 (M77), NGC 2841 ; NGC 3351 (M95) et NGC 7331.

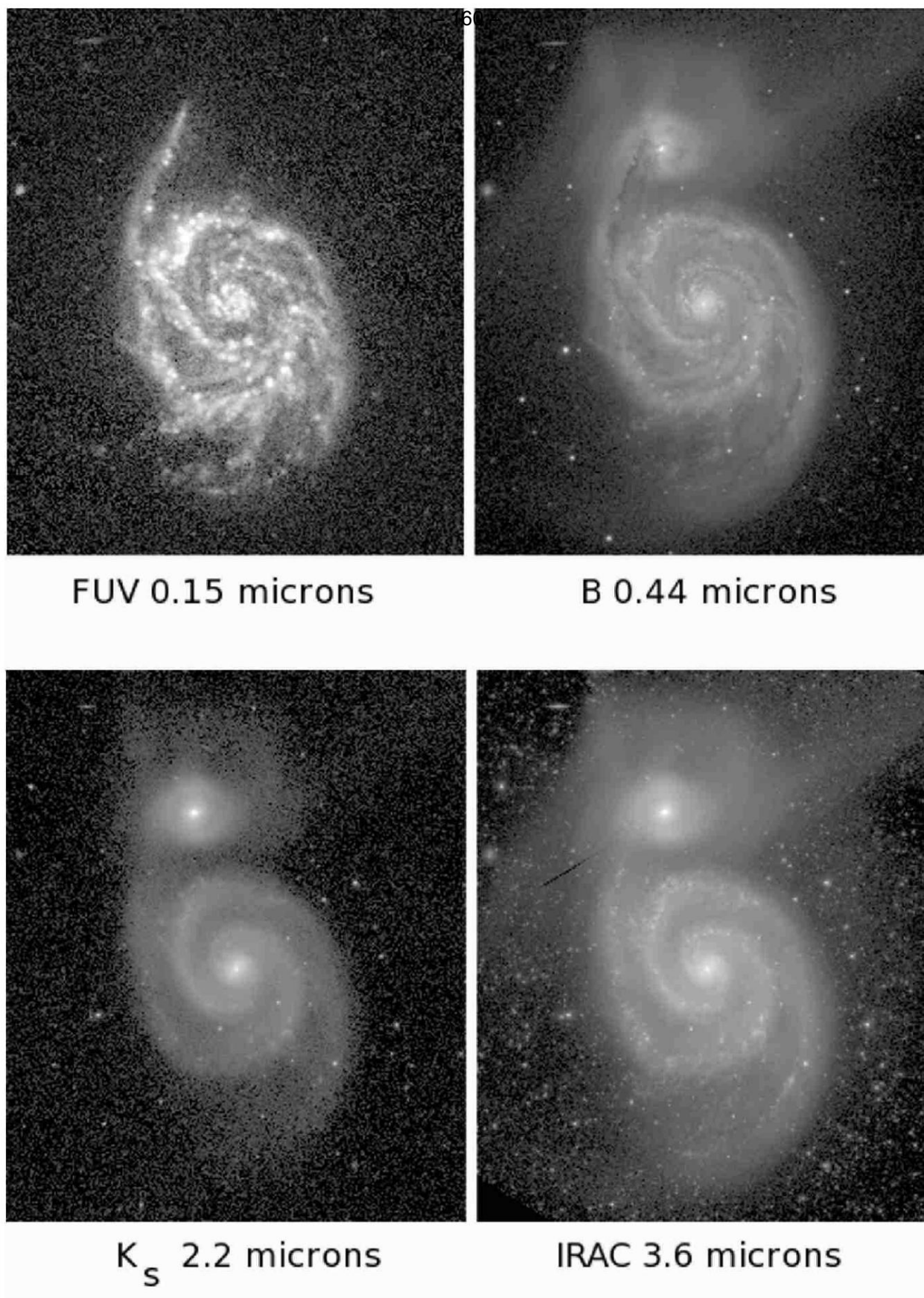


Fig. 41.— Images multi-longueurs d'onde de M51.

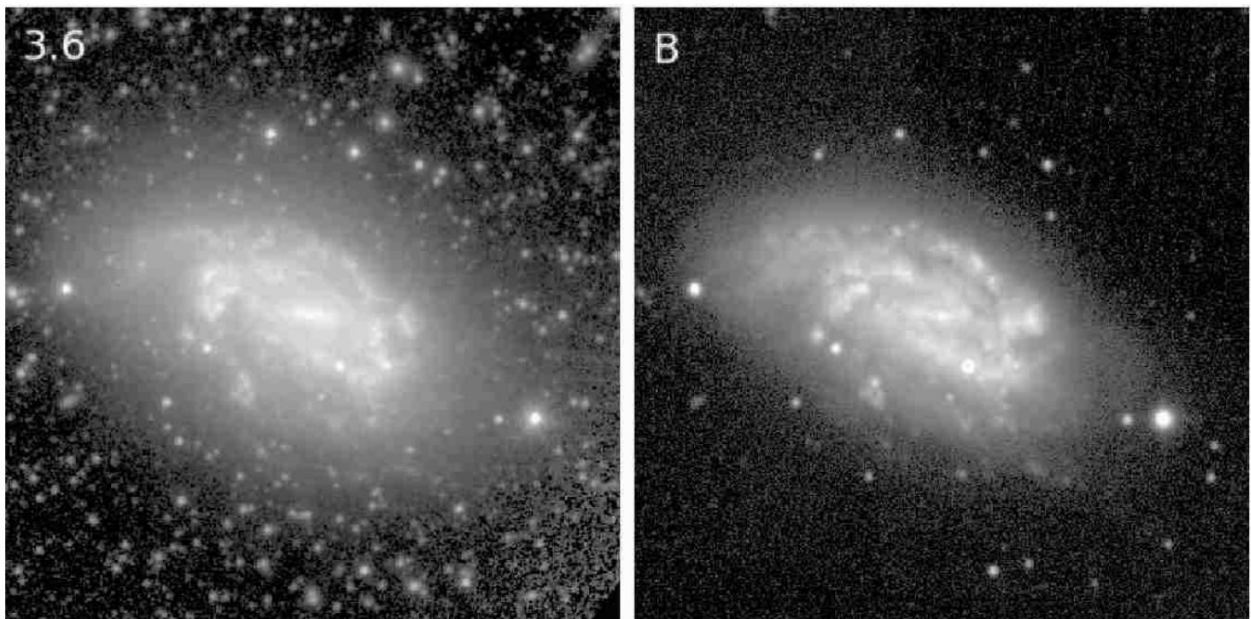


Fig. 42.— Comparaison de l'image IRAC 3,6 μm de NGC 1559 (à gauche) avec un B- basé au sol.
image de bande de la même galaxie à droite. Notez la correspondance significative des fonctionnalités
entre les deux domaines de longueurs d'onde très différents dans ce cas.

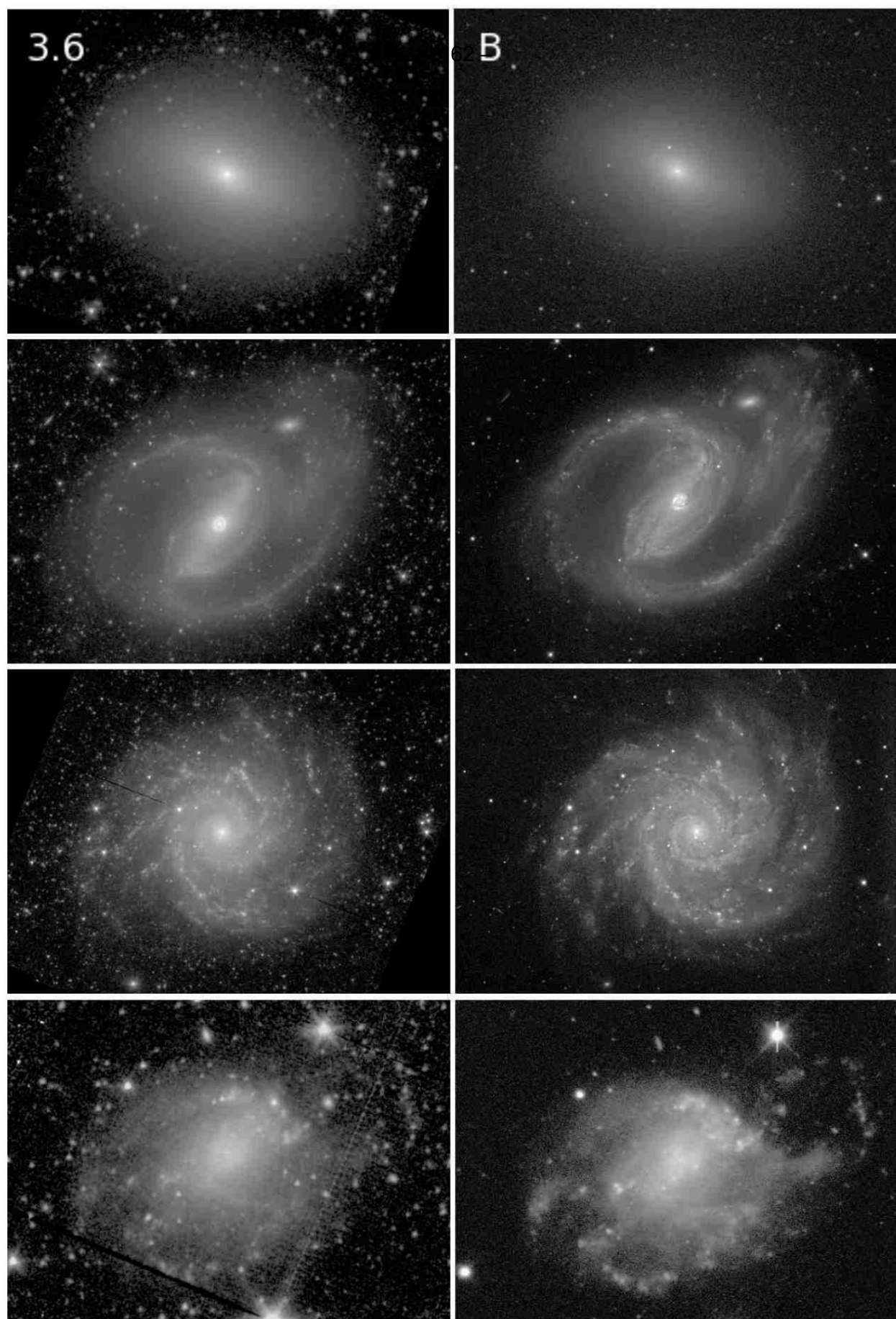


Fig. 43.— Comparaison des images IRAC 3,6 μ m (images de gauche) avec la bande B au sol images pour (de haut en bas) : NGC 584, 1097, 628 et 428.

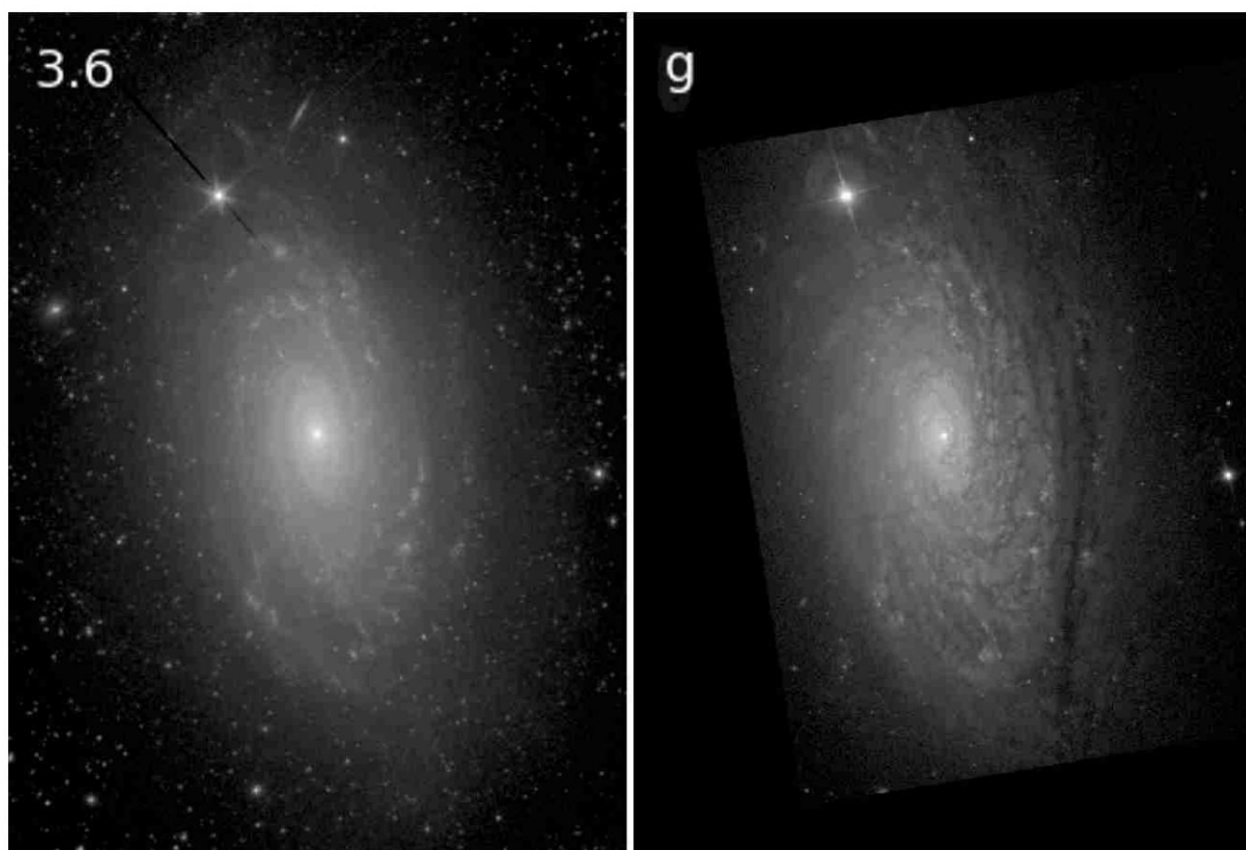


Fig. 44.— Comparaison des images en bande g IRAC 3,6 μm et SDSS de la spirale floculente galaxie NGC 5055.

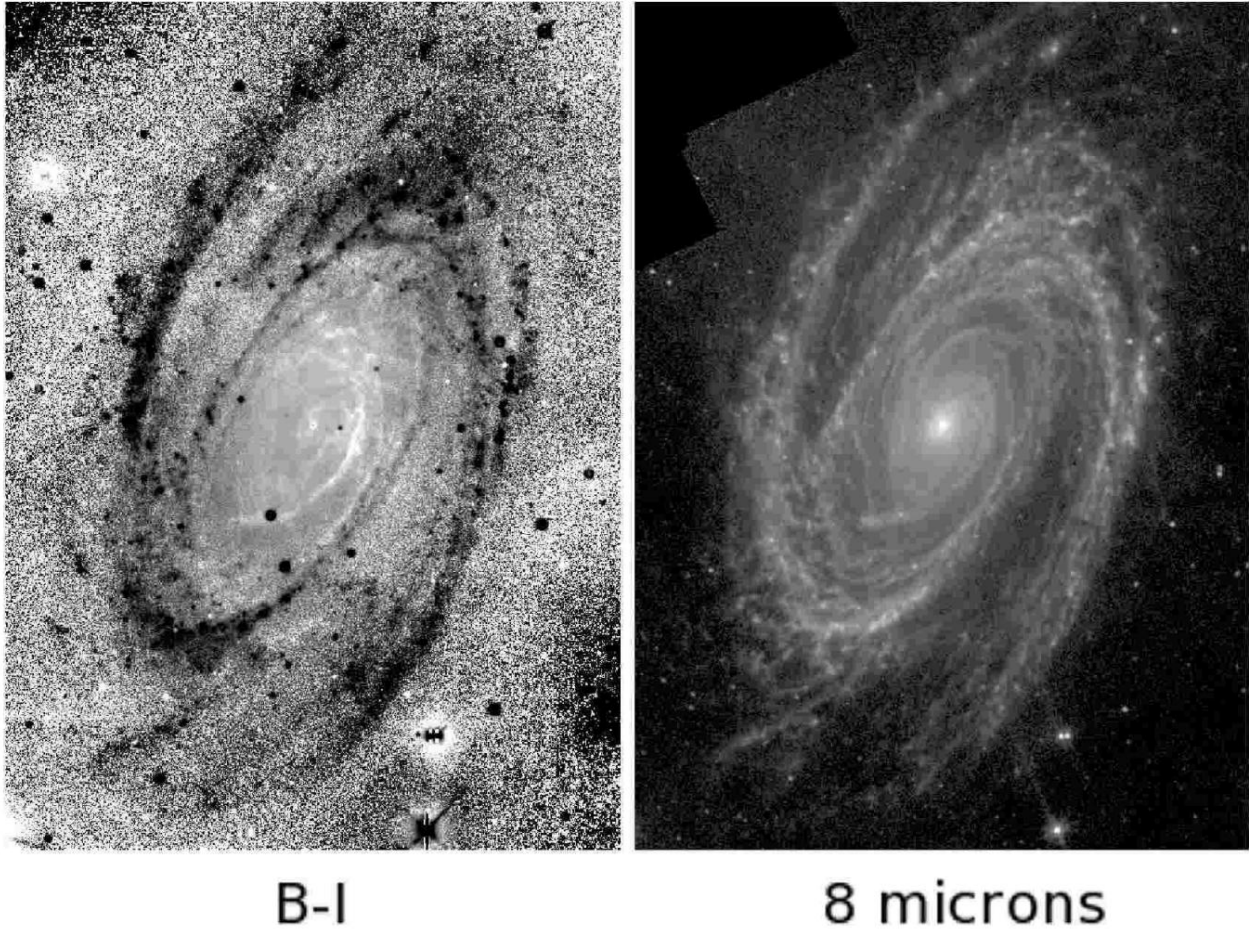


Fig. 45.— Comparaison entre une carte d'indice de couleur B - I et une carte d'émission de poussière de 8 μ m de la galaxie spirale voisine M81.

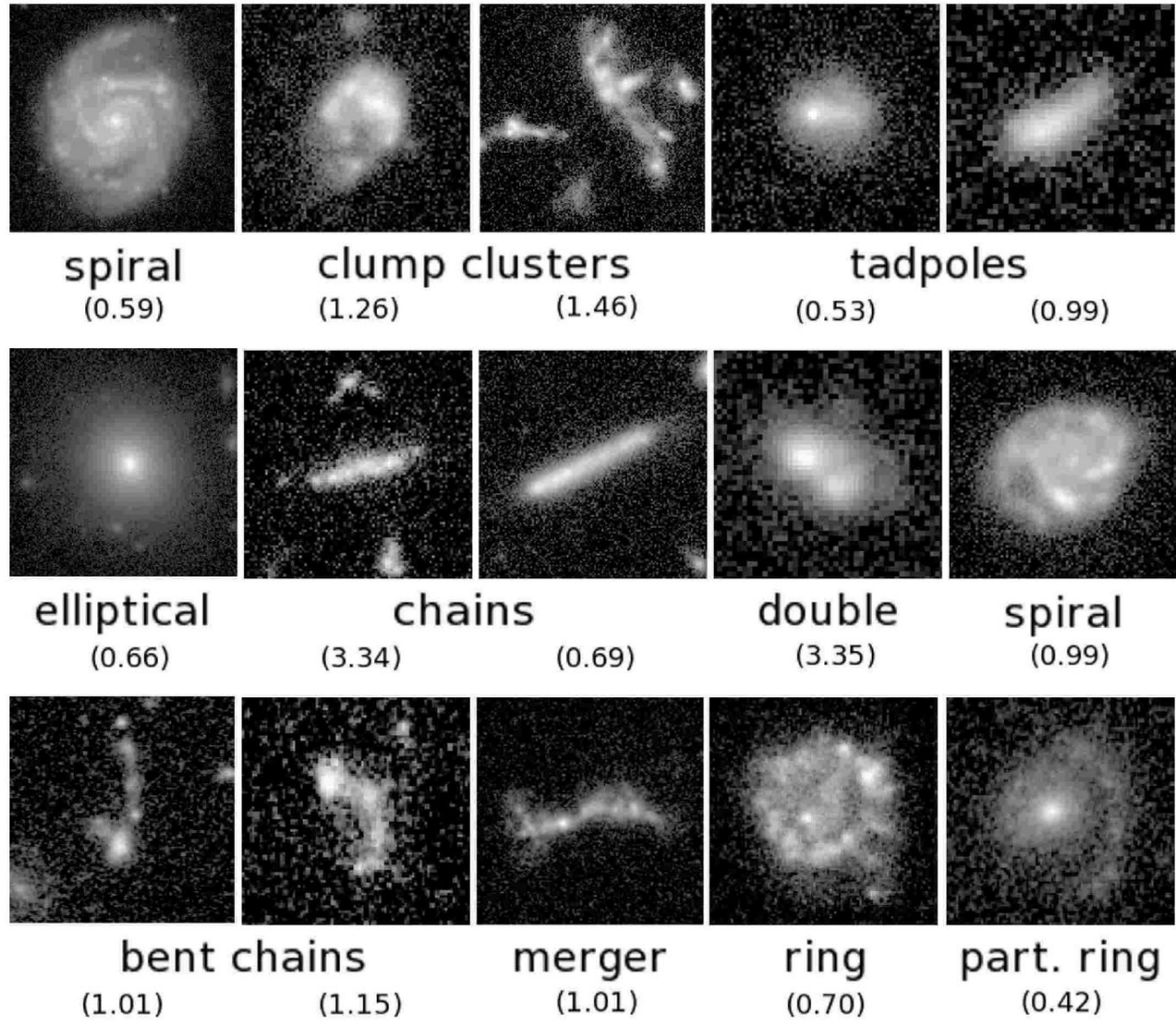


Fig. 46.— Morphologie des galaxies à redshift intermédiaire à élevé (bandes V et i). Les catégories sont dues à EES04 et EE06. Le nombre entre parenthèses sous chaque image est le redshift z de la galaxie montrée.

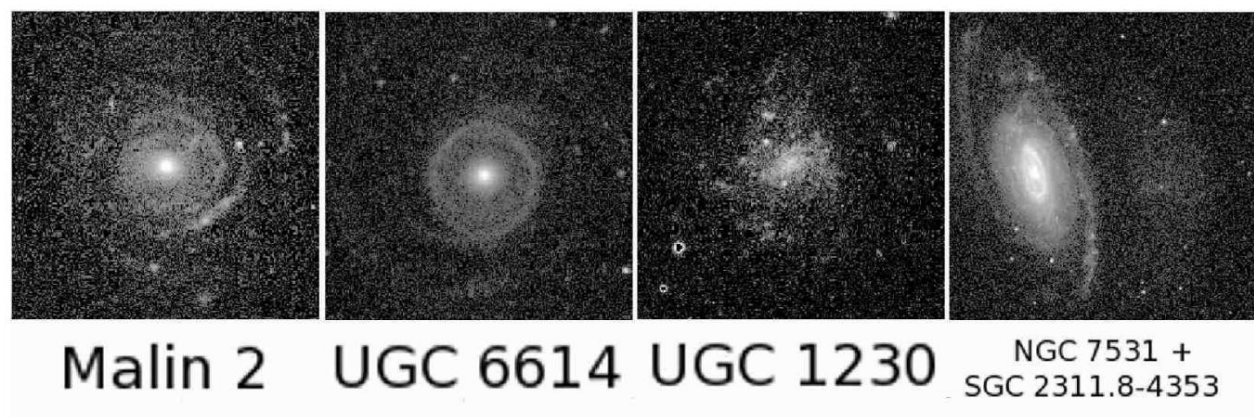


Fig. 47.— Exemples de galaxies géantes ou de grandes galaxies à faible luminosité de surface. Dans le panneau le plus à droite, SGC 2311.8–4353 est l'objet diffus à droite de la spirale NGC à haute luminosité de surface 7531. Toutes ces images sont en bande B.

– 167 –

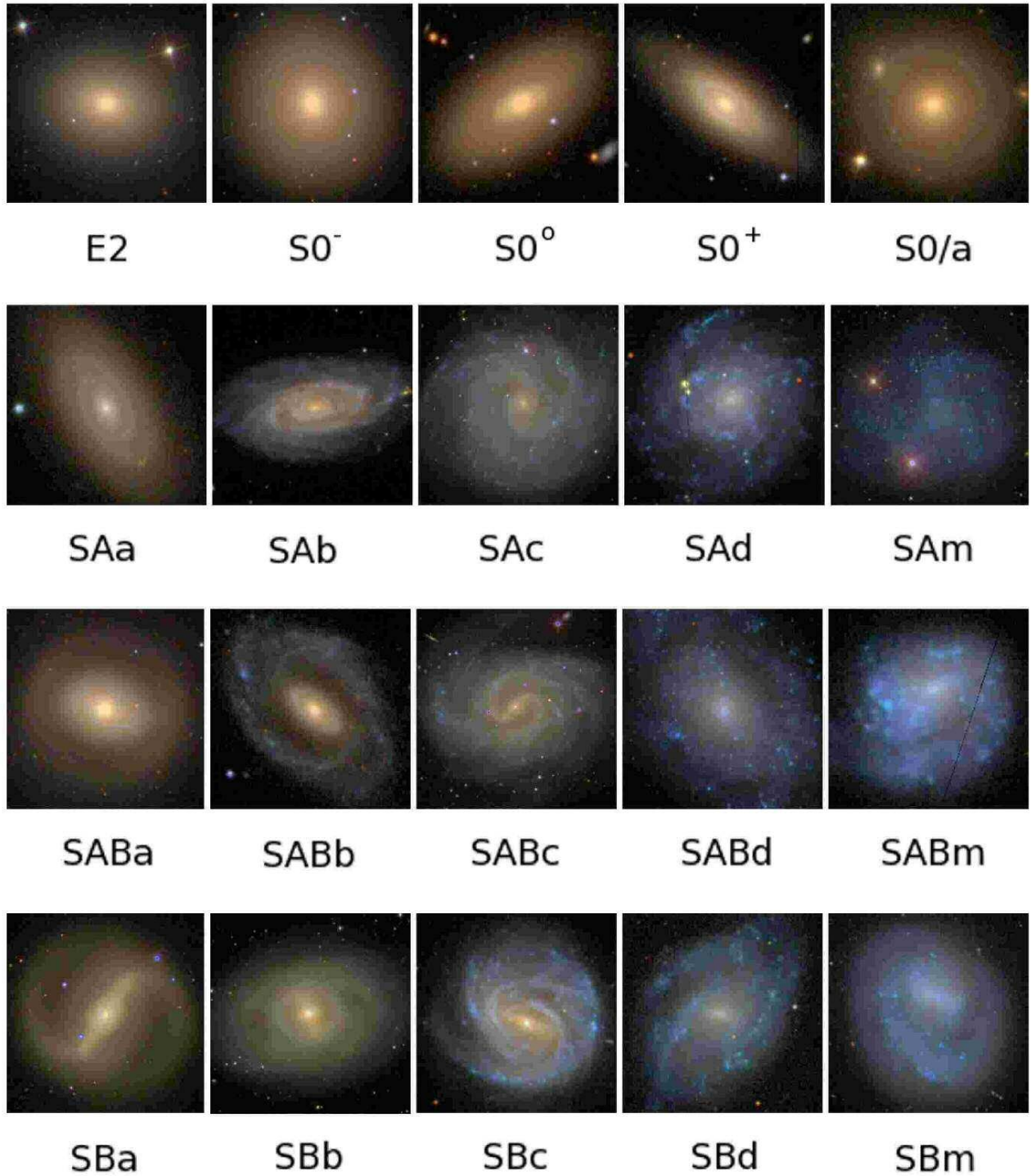


Fig. 48.— Le diapason Hubble des vélos elliptiques, S0 et spirales de différentes classifications de barres sont présentés ici à l'aide d'images couleur SDSS. Les galaxies sont (de gauche à droite) : Rangée 1 - NGC 3608, 4203, 6278, 4324 et 932. Rangée 2 - NGC 4305, 5351, 3184, 5668 et IC 4182. Rangée 3 - NGC 4457, 5409, 4535, 5585 et 3445. Rangée 4 - NGC 4314, 3351, 3367, 4519 et 4618.

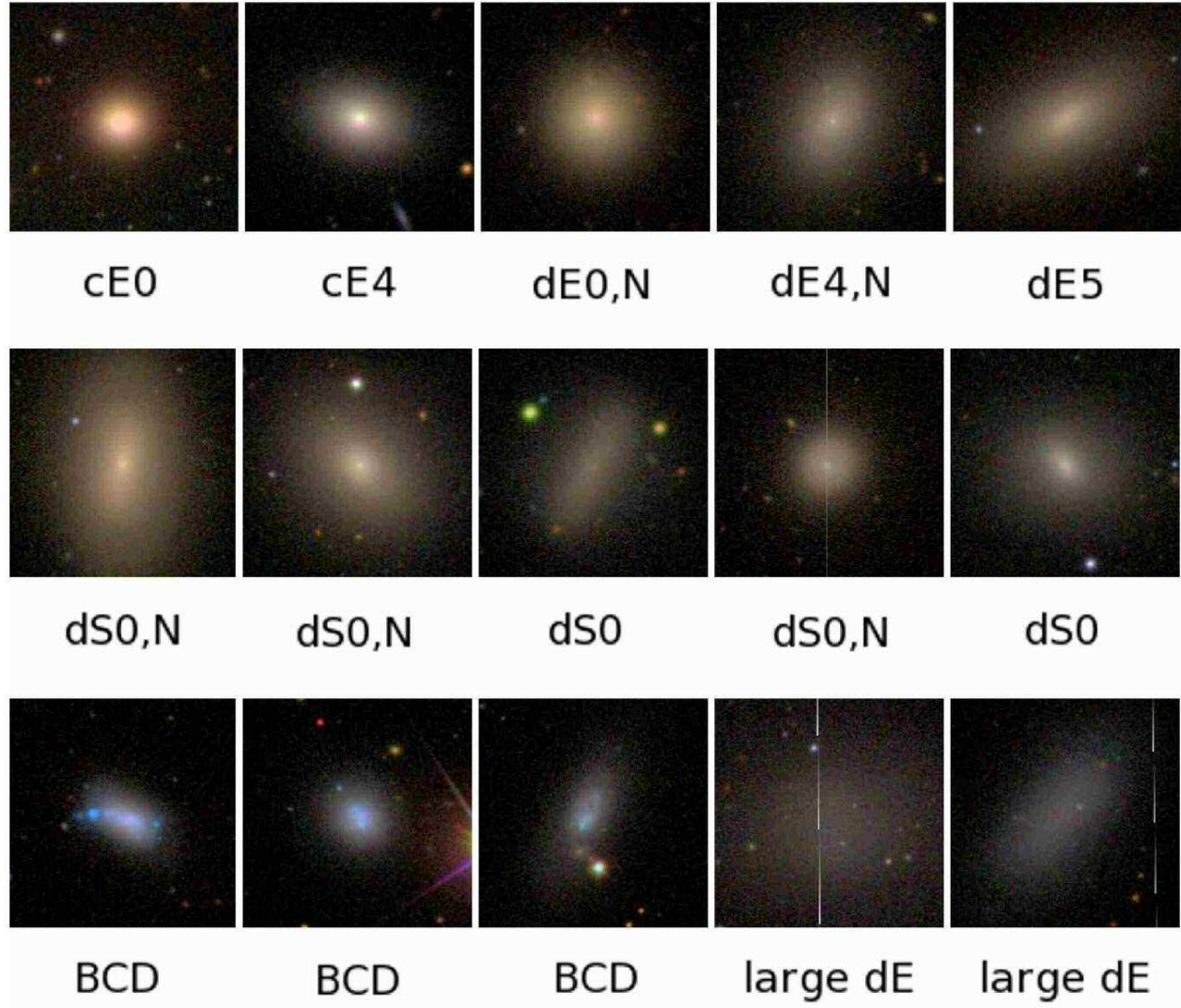


Fig. 49.— Exemples de galaxies naines de l'amas de la Vierge, tirées du catalogue de Binggeli, Sandage et Tammann (1985) et mis en évidence à l'aide d'images couleur SDSS. Les classifications proviennent du catalogue BST et les galaxies sont (de gauche à droite) : Rangée 1 - NGC 4486B, IC 767, IC 3470, IC 3735 et UGC 7436. Rangée 2 – NGC 4431, IC 781, IC 3292, VCC 278, IC 3586. Rangée 3 : VCC 459, VCC 2033, VCC 841, IC 3475 et IC 3647.

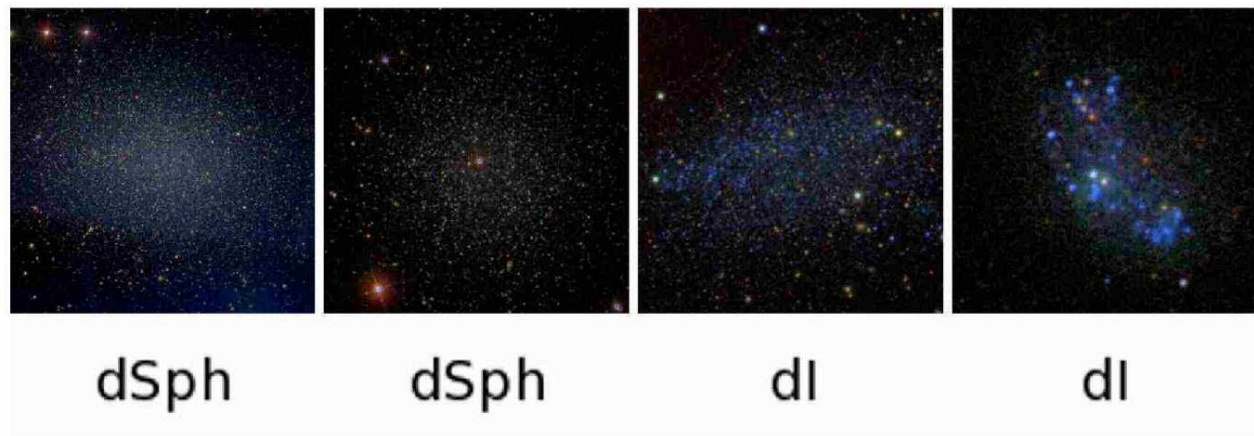


Fig. 50.— Quatre nains du groupe local ayant $M_V > -12$ (de gauche à droite) : Lion I, Lion II, Lion A, et DDO 155 (toutes les images couleur SDSS)

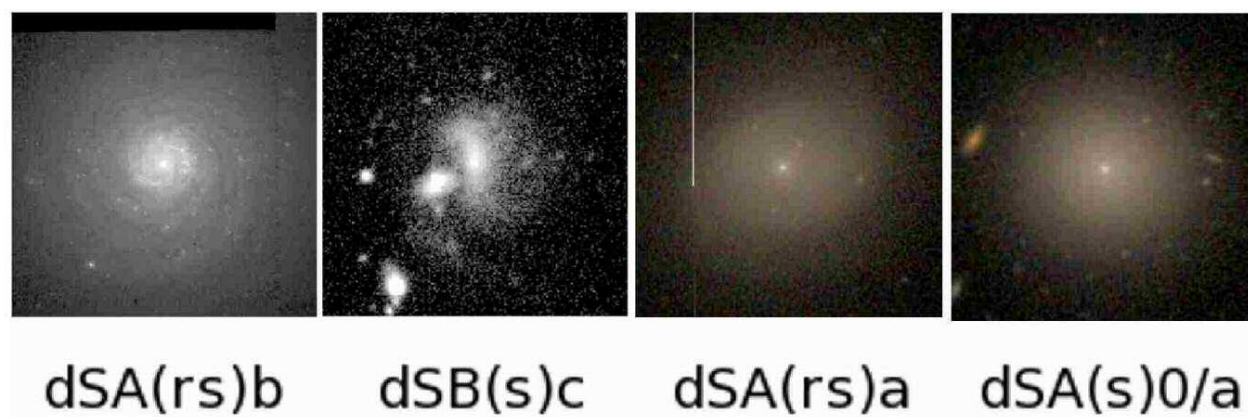


Fig. 51.— Quatre galaxies spirales naines (de gauche à droite) : NGC 3928, D563–4, IC 783 et IC 3328

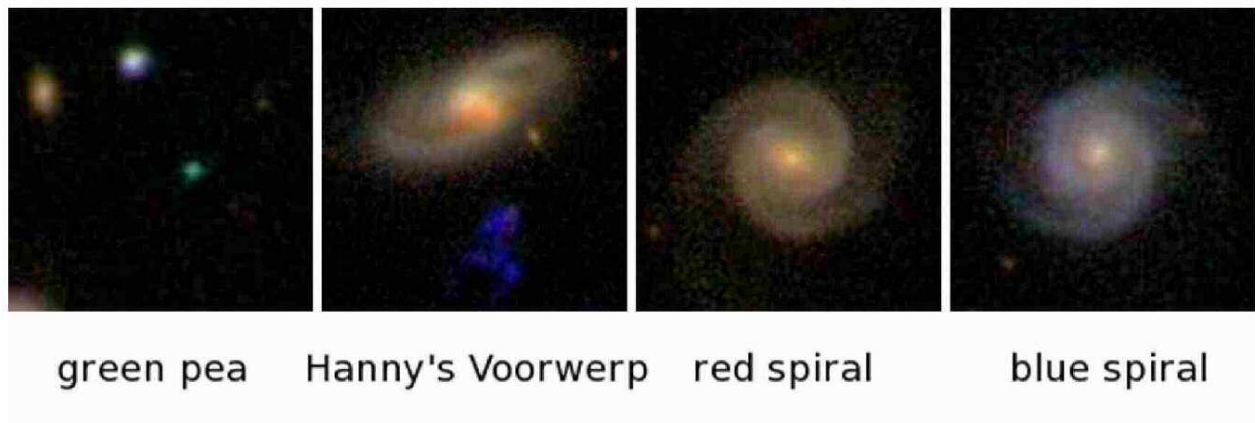


Fig. 52.— Morphologies et caractéristiques de couleur intéressantes trouvées par le projet Galaxy Zoo

participants de l'équipe. Un « pois vert » est une galaxie semblable à une étoile avec un flux élevé en [OIII] 5007.

"Hanny's Voorwerp" est un nuage de gaz ionisé qui pourrait être l'écho léger d'une explosion de quasar

dans le noyau de l'IC 2497 voisin. Les spirales rouges sont morphologiquement similaires aux spirales bleues, mais

ont un taux de formation d'étoiles plus faible. (Toutes les images couleur SDSS)

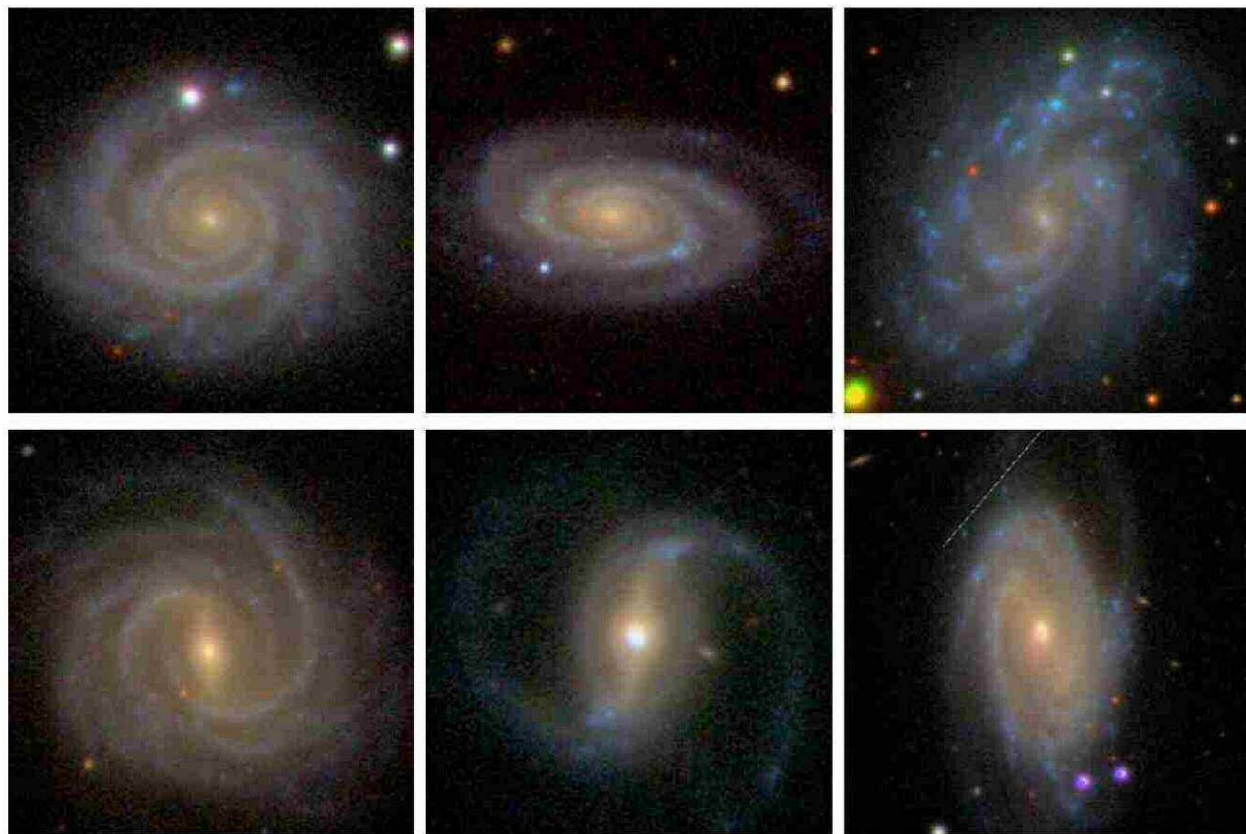
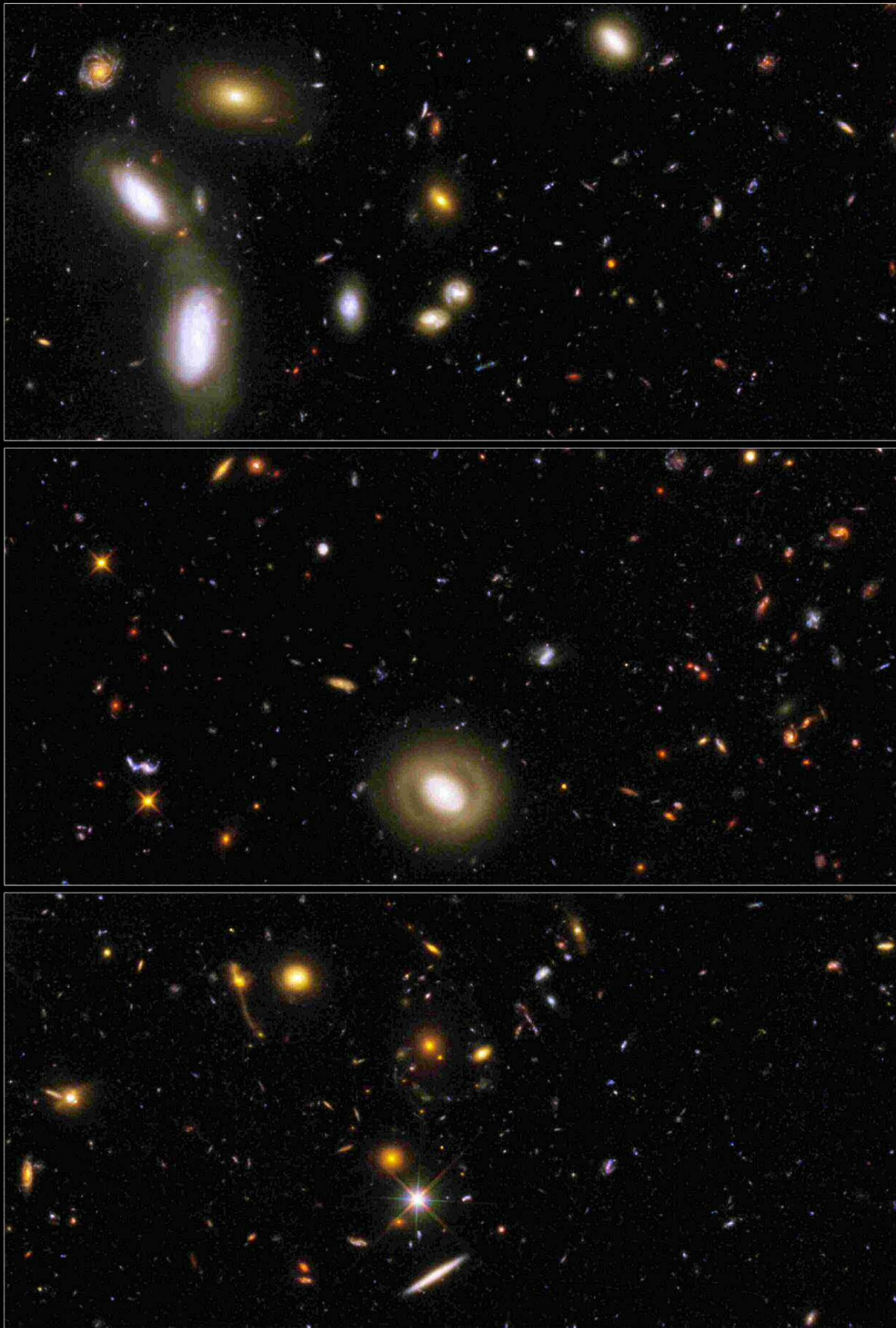


Fig. 53.— Images couleur SDSS de six galaxies Sb-Sc isolées, barrées et non barrées, de l'échantillon AMIGA, une version raffinée du Catalogue des Galaxies Isolées (Karachentseva 1973). Les galaxies sont (de gauche à droite) : Rangée 1 : NGC 2649, 5622 et 5584 ; Rangée 2 : NGC 4662, 4719 et 2712.

GOODS South/ERS Details

HST ■ WFC3/UVIS/IR ■ ACS/WFC



NASA, ESA, R. Windhorst (Arizona State University),
P. McCarthy (Carnegie Institution of Washington),
R. O'Connell (University of Virginia), and the WFC3 Science Oversight Committee

STScI-PRC10-01b

Figure 54.—

Fig. 54. (suite).— Trois sous-sections de l'enquête WFC3-ERS du champ GOODS-sud (Windhorst et al.2010). Les couleurs sont basées sur des images obtenues avec 10 filtres allant de $0,2\mu\text{m}$ à $2\mu\text{m}$.

Galaxy Morphology¹

Ronald J. Buta

Department of Physics and Astronomy, University of Alabama, Box 870324, Tuscaloosa,
AL 35487

Received _____; accepted _____

¹To be published in Planets, Stars, and Stellar Systems, Vol. 6, Series Editor T. D. Oswalt, Volume editor W. C. Keel, Springer Reference, 2011

ABSTRACT

Galaxy morphology is a product of how galaxies formed, how they interacted with their environment, how they were influenced by internal perturbations, AGN, and dark matter, and of their varied star formation histories. This article reviews the phenomenology of galaxy morphology and classification with a view to delineating as many types as possible and how they relate to physical interpretations. The old classification systems are refined, and new types introduced, as the explosion in available morphological data has modified our views on the structure and evolution of galaxies.

Subject headings: galaxies: spiral; galaxies: elliptical; galaxies: S0s; galaxies: structure; galaxies: high redshift; galaxies: classification; galaxies: peculiar; galaxies: dwarfs; galaxies: clusters; galaxies: active; galaxies: isolated; galaxies: Galaxy Zoo project

Index terms: Hubble-Sandage-de Vaucouleurs classification; spiral galaxies; elliptical galaxies; S0 galaxies; irregular galaxies; resonance ring galaxies; outer rings; inner rings; nuclear rings; secondary bars; nuclear bars; pseudorings; grand design spirals; flocculent spirals; merger morphologies; tidal tails; collisional ring galaxies; polar ring galaxies; barred galaxies; lens galaxies; spiral arm classes; counter-winding spiral galaxies; anemic spiral galaxies; spiral arm multiplicity; dust lanes; pseudobulges; classical bulges; dust-lane elliptical galaxies; shell/ripple galaxies; ultra-luminous infrared galaxies; bar ansae; brightest cluster members; low surface brightness galaxies; dwarf galaxies; dwarf spiral galaxies; dwarf spheroidal galaxies; Galaxy Zoo project; isolated galaxies; blue compact dwarf galaxies; star-forming galaxy morphologies; warped disks; stellar mass morphology; luminosity classes; boxy ellipticals; disky ellipticals; late-type galaxies; early-type galaxies;

Magellanic barred galaxies; color galaxy morphology; atomic and molecular gas galaxy morphology

Contents

1	Introduction	6
2	Overview	8
3	Galaxy Classification	12
4	A Continuum of Galactic Forms	15
5	Galaxy Types: Stage, Family, and Variety	17
5.1	Elliptical and Spheroidal Galaxies	17
5.2	S0 and Spiral Galaxies	21
5.3	Irregular Galaxies	27
6	Other Dimensions to Galaxy Morphology	28
6.1	Outer Rings and Pseudorings	28
6.2	Inner and Outer Lenses	30
6.3	Nuclear Rings and Bars	31
6.4	Spiral Arm Morphologies	33
6.5	Luminosity Effects	37

7	The Morphology of Galactic Bars and Ovals	38
8	Dust Morphologies	41
9	The Morphologies of Galactic Bulges	43
10	Effects of Interactions and Mergers	46
10.1	Normal versus Catastrophic Rings	46
10.2	Environmental Effects on Star-Forming Disks	51
10.3	Interacting and Peculiar Galaxies	54
10.3.1	Tidal Tails, Arms, and Bridges	54
10.3.2	Dust-Lane Ellipticals	55
10.3.3	Shell/Ripple Galaxies	56
10.3.4	Ultra-Luminous Infrared Galaxies	57
10.4	Warps	58
10.5	The Morphology of Active Galaxies	59
10.6	The Morphology of Brightest Cluster Members	61
11	Star Formation Morphologies	62
11.1	H α Imaging	62
11.2	Ultraviolet Imaging	64
11.3	Atomic and Molecular Gas Morphology	65

12 Infrared Observations: Galactic Stellar Mass Morphology	69
13 Intermediate and High Redshift Galaxy Morphology	74
14 Giant Low Surface Brightness Galaxies	81
15 Galaxy Morphology in Color	83
15.1 Normal Galaxies	83
15.2 Dwarf Galaxies	85
15.2.1 dE, dS0, BCD, and cE Galaxies	85
15.2.2 Local Group Dwarf Spheroidals and Irregulars	87
15.2.3 Dwarf Spirals	88
15.3 Galaxy Zoo Project	89
15.4 Isolated Galaxies	91
15.5 Deep Field Color Imaging	93
16 Large-Scale Automated Galaxy Classification	93
17 The Status and Future of Morphological Studies	94

1. Introduction

In the nearly 100 years since galaxy morphology became a topic of research, much has been learned about galactic structure and dynamics. Known only as “nebulae” at that time, galaxies were found to have a wide range of largely inexplicable forms whose relations to one another were a mystery. As data accumulated, it became clear that galaxies are fundamental units of matter in space, and an understanding of how they formed and evolved became one of the major goals of extragalactic studies. Even in the era of space observations, galaxy morphology continues to be the backbone of extragalactic research as modern instruments provide information on galactic structure across a wide range of distances and lookback times.

In spite of the advances in instrumentation and the explosion of data, classical galaxy morphology (i. e., the visual morphological classification in the style of Hubble and others) has not lost its relevance. The reasons for this are as follows:

1. Morphology is still a logical starting point for understanding galaxies. Sorting galaxies into their morphological categories is similar to sorting stars into spectral types, and can lead to important astrophysical insights. Any theory of galaxy formation and evolution will have to, at some point, account for the bewildering array of galactic forms.
2. Galaxy morphology is strongly correlated with galactic star formation history. Galaxies where star formation ceased gigayears ago tend to look very different from those where star formation continues at the present time. Classical morphology recognizes these differences in an ordered way.
3. Information on galaxy morphology, in the form of new types of galaxies, multi-wavelength views of previously known galaxy types, and higher resolution views of all or part of some galaxies, has exploded as modern instrumentation has superceded the old photographic

plates that were once used exclusively for galaxy classification.

4. Galaxy classification has gone beyond the realm of a few thousand galaxies to that of a *million* galaxies through the Galaxy Zoo project. Not only this, but GalaxyZoo has taken morphology from the exclusive practice of a few experts to the public at large, thus facilitating citizen science at its best. Galaxy Zoo images are also in *color*, thus allowing the recognition of special galaxy types and features based on stellar populations or gaseous emission.

5. Finally, deep surveys with the Hubble Space Telescope have extended morphological studies well beyond the realm of the nearby galaxies that dominated early catalogues, allowing detailed morphology to be distinguished at unprecedented redshifts.

Now, more than ever, galaxy morphology is a vibrant subject that continues to provide surprises as more galaxies are studied for their morphological characteristics across the electromagnetic spectrum. It is clear that a variety of effects are behind observed morphologies, including environmental density and merger/interaction history, internal perturbations, gas accretions, nuclear activity, secular evolution, as well as the diversity in star formation histories, and that a global perspective based on large numbers of galaxies will improve theoretical models and give a more reliable picture of galactic evolution.

The goal of this article is to present the phenomenology of galaxy morphology in an organized way, and highlight recent advances in understanding what factors influence morphology and how various galaxy types are interpreted. The article is a natural follow-up to the excellent review of galaxy morphology and classification by Sandage (1975) in Volume IX of the classic *Stars and Stellar Systems* series. It also complements the recently published *de Vaucouleurs Atlas of Galaxies* (Buta, Corwin, & Odewahn 2007, hereafter the dVA), which provided a detailed review of the state and technique of galaxy classification up to about the year 2005. Illustrations are very important in a review of this nature,

and the article draws on a large number of sources of images. For this purpose, the Sloan Digital Sky Survey (SDSS), the NASA/IPAC Extragalactic Database (NED), and the dVA have been most useful.

2. Overview

As extended objects rather than point sources, galaxies show a wide variety of forms, some due to intrinsic structures, others due to the way the galaxy is oriented to the line of sight. The random orientations, and the wide spread of distances, are the principal factors that can complicate interpretations of galaxy morphology. If we could view every galaxy along its principal axis of rotation, and from the same distance, then fairer comparisons would be possible. Nevertheless, morphologies seen in face-on galaxies can also often be recognized in more inclined galaxies (Figure 1). It is only for the highest inclinations that morphology switches from face-on radial structure to vertical structure. In general we either know the planar structure in a galaxy, or we know its vertical structure, but we usually cannot know both well from analysis of images alone.

Galaxy morphology began to get interesting when the “Leviathan of Parsonstown”, the 72-inch meridian-based telescope built in the 1840s by William Parsons, Third Earl of Rosse, on the grounds of Birr Castle in Ireland, revealed spiral patterns in many of the brighter Herschel and Messier “nebulae.” The nature of these nebulae as galaxies wasn’t fully known at the time, but the general suspicion was that they were star systems (“island universes”) like the Milky Way, only too distant to be easily resolved into their individual stars. In fact, one of Parsons’ motivations for building the “Leviathan” was to try and resolve the nebulae to prove this idea. The telescope did not convincingly do this, but the discovery of spiral structure itself was very important because such structure added to the mystique of the nebulae. The spiral form was not a random pattern and had

to be significant in what it meant. The telescope was not capable of photography, and observers were only able to render what they saw with it in the form of sketches. The most famous sketch, that of M51 and its companion NGC 5195, has been widely reproduced in introductory astronomy textbooks.

While visual observations could reveal some important aspects of galaxy morphology, early galaxy classification was based on photographic plates taken in the blue region of the spectrum. Silver bromide dry emulsion plates were the staple of astronomy beginning in the 1870s and were relatively more sensitive to blue light than to red light. Later, photographs taken with Kodak 103a-O and IIa-O plates became the standard for galaxy classification. In this part of the spectrum, massive star clusters, dominated by spectral class O and B stars, are prominent and often seen to line the spiral arms of galaxies. These clusters, together with extinction due to interstellar dust, can give blue light images a great deal of detailed structure for classification. It is these types of photographs which led to the galaxy classification systems in use today.

In such photographs, we see many galaxies as a mix of structures. Inclined galaxies reveal the ubiquitous *disk* shape, the most highly flattened subcomponent of any galaxy. Studies of Doppler wavelength shifts in the spectra of disk objects (like HII regions and integrated star light) reveal that disks rotate differentially. If a galaxy is spiral, the disk is usually where the arms are found, and also where the bulk of interstellar matter is found. The radial luminosity profile of a disk is usually *exponential*, with departures from an exponential being due to the presence of other structures.

In the central area of a disk-shaped galaxy, there is also often a bright and sometimes less flattened mass concentration in the form of a *bulge*. The nature of bulges and how they form has been a topic of much recent research, and is discussed further in section 9. Disk galaxies range from virtually bulge-less to bulge-dominated. In the center there may also be

a conspicuous *nucleus*, a bright central concentration that was usually lost to overexposure in photographs. Nuclei may be dominated by ordinary star light, or may be *active*, meaning their spectra show evidence of violent gas motions.

Bars are the most important internal perturbations seen in disk-shaped galaxies. A bar is an elongated mass often made of old stars crossing the center. If spiral structure is present, the arms usually begin near the ends of the bar. Although most easily recognized in the face-on view, bars have generated great interest recently in the unique ways they can also be detected in the edge-on view. Not all bars are made exclusively of old stars. In some bulge-less galaxies, the bar has considerable gas and recent star formation.

Related to bars are elongated disk features known as *ovals*. Ovals usually differ from bars in lacking higher order Fourier components (i.e., have azimuthal intensity distributions that vary mainly as 2θ), but nevertheless can be major perturbations in a galactic disk. The entire disk of a galaxy may be oval, or a part of it may be oval. Oval disks are most easily detected if there is considerable light or structure at larger radii.

Rings are prominent features in some galaxies. Often defined by recent star formation, rings may be completely closed features or may be partial or open, the latter called “pseudorings.” Rings can be narrow and sharp or broad and diffuse. It is particularly interesting that several kinds of rings are seen, and that some galaxies can have as many as four recognizable ring features. *Nuclear rings* are the smallest rings and are typically seen in the centers of barred galaxies. *Inner rings* are intermediate-scale features that often envelop the bar in a barred galaxy. Outer rings are large, low surface brightness features that typically lie at about twice the radius of a bar. Other kinds of rings, called accretion rings, polar rings, and collisional rings, are also known but are much rarer than the inner, outer, and nuclear rings of barred galaxies. The latter kinds of rings are also not exclusive to barred galaxies, but may be found also in nonbarred galaxies.

Lenses are features, made usually of old stars, that have a shallow brightness gradient interior to a sharp edge. They are commonly seen in Hubble’s disk-shaped S0 class (section 5.2). If a bar is present, the bar may fill a lens in one dimension. Lenses may be round or slightly elliptical in shape. If elliptical in shape they would also be considered ovals.

Nuclear bars are the small bars occasionally seen in the centers of barred galaxies, often lying within a nuclear ring. When present in a barred galaxy, the main bar is called the “primary bar” and the nuclear bar is called the “secondary bar.” It is possible for a nuclear bar to exist in the absence of a primary bar.

Dust lanes are often seen in optical images of spiral galaxies, and may appear extremely regular and organized. They are most readily evident in edge-on or highly inclined disk galaxies, but are still detectable in the face-on view, often on the leading edges of bars or the concave sides of strong inner spiral arms.

Spiral arms may also show considerable morphological variation. Spirals may be regular 1, 2, 3, or 4-armed patterns, and may also be higher order multi-armed patterns. Spirals may be tightly wrapped (low pitch angle) or very open (high pitch angle.) A *grand-design* spiral is a well-defined global pattern, often detectable as smooth variations in the stellar density of old disk stars. A *flocculent* spiral is made of small pieces of spiral structure that appear sheared by differential rotation. Their appearance can be strongly affected by dust, such that at longer wavelengths a flocculent spiral may appear more grand-design. Pseudorings can be thought of as variable pitch angle spirals which close on themselves, as opposed to continuously opening, constant pitch angle, logarithmic spirals.

There are also numerous structures outside the scope of traditional galaxy classification, often connected with strong interactions between galaxies. Plus, the above described features are not necessarily applicable or relevant to what we see in very distant galaxies. Accounting for all of the observed features of nearby galaxies, and attempting to connect

what we see nearby to what is seen at high redshift, is a major goal of morphological studies.

3. Galaxy Classification

As noted by Sandage (1975), the first step in studying any class of objects is a classification of those objects. Classification built around small numbers of shared characteristics can be used for sorting galaxies into fundamental categories, which can then be the basis for further research. From such research, physical relationships between identified classes may emerge, and these relationships may foster a theoretical interpretation that places the whole class of objects into a global context. There is no doubt that such an approach greatly contributed to the development of the science of biology, and this is no less true for galaxies.

The genesis of galaxy classification is to take the complex combinations of structures described in the previous section and summarize them with a few type symbols. Sandage (1975) describes the earlier classification systems of Wolf, Reynolds, Lundmark, and Shapley that fell into dis-use more than 50 years ago. The Morgan (1958) spectral type/concentration classification system, which was based on a connection between morphology (specifically central concentration) and the stellar content of the central regions, was used recently by Bershadsky, Jangren, & Conselice (2000) in a mostly quantitative manner (see also Abraham et al. 2003). Thus, Morgan’s system has in a way survived into the modern era but not in the purely visual form that he proposed. Only one Morgan galaxy type, the supergiant cD type, is still used extensively (section 10.6). Van den Bergh’s luminosity/arm morphology classification system is described by van den Bergh (1998; see section 6.5).

The big survivor of the early visual classification systems was that of Hubble (1926,

1936), as later revised and expanded upon by Sandage (1961) and de Vaucouleurs (1959). Sandage (1975) has argued that one reason Hubble’s view prevailed is that he did not try and account for every superficial detail, but kept his classes broad enough that the vast majority of galaxies could be sorted into one of his proposed bins. These bins were schematically illustrated in Hubble’s famous “tuning fork”² (Hubble 1936; reproduced in Figure 2) recognizing a sequence of progressive flattenings from ellipticals to spirals. Ellipticals had only two classification details: the smoothly declining brightness distribution with no inflections, and no evidence for a disk; and the ellipticity of the isophotes, indicated by a number after the “E” symbol. (For example, E3 means the ellipticity is 0.3.) Spirals were systems more flattened than an E7 galaxy that could be subdivided according to the degree of central concentration, the degree of openness of the arms, the degree of resolution of the arms into complexes of star formation (all three criteria determining position along the fork), and on the presence or absence of a bar (determining the appropriate prong of the fork).

The S0 class at the juncture of the prongs of the fork was still hypothetical in 1936. As “armless disk galaxies,” S0s were mysterious because all examples known in 1936 were barred. These were classified as SBa, but this was a troubling inconsistency because nonbarred Sa galaxies had full spiral patterns. Hubble predicted the existence of nonbarred S0s to fill the gap between type E7³ and Sa and cure what he felt was a “cataclysmic”

²As recently noted by D. L. Block (Block et al. 2004a), this diagram may have been inspired by a similar schematic by Jeans (1929).

³ van den Bergh (2009a) shows that E0-E4 galaxies are more luminous on average than are E5-E7 galaxies, suggesting that all E7 galaxies (and not many have been recognized) are actually S0 galaxies. Van den Bergh argues that genuine E galaxies may be no more flattened than E6.

transition.

It was not long before Hubble himself realized that the tuning fork could not adequately represent the full diversity of galaxy morphologies, and after 1936 he worked on a revision that included real examples of the sought group: nonbarred S0 galaxies. Based on fragmentary notes he left behind, Sandage (1961) prepared the *Hubble Atlas of Galaxies* to illustrate Hubble’s revision, and also added a third dimension: the presence or absence of a ring. This was the first major galaxy atlas illustrating a classification system in a detailed, sophisticated way with beautifully produced photographs. Hubble’s revision, with van den Bergh luminosity classes (Sandage & Tammann 1981), was updated and extended to types later than Sc by Sandage & Bedke (1994).

Because Sandage (1961) and Sandage & Bedke (1994) describe the Hubble-Sandage revision so thoroughly, the details will not be repeated here. Instead, the focus of the next section will be on the de Vaucouleurs revision as outlined in the dVA. The reasons for this are: (1) the de Vaucouleurs classification provides the most familiar galaxy types to extragalactic researchers, mostly because of extensive continuing use of the Third Reference Catalogue of Bright Galaxies (RC3, de Vaucouleurs et al. 1991); and (2) the de Vaucouleurs classification is still evolving to cover more details of galaxy morphology considered significant at this time. It should be noted that both the de Vaucouleurs and Hubble-Sandage revisions are strictly applicable only to $z \approx 0$ galaxies and that it is often difficult to fit objects having $z > 0.5$ neatly into the categories defining these classification systems. High redshift galaxy morphology is described in section 13.

4. A Continuum of Galactic Forms

The Hubble tuning fork is useful because it provides a visual representation of information Hubble (1926) had only stated in words. The fork contains an implication of continuity. For example, it does not rule out that there might be galaxies intermediate in characteristics between an "Sa" or "Sb" spiral, or between a normal "S" spiral and a barred "SB" spiral. Continuity along the elliptical galaxy sequence was always implied as a smooth variation from round ellipticals (E0) to the most flattened ellipticals (E7). Sandage (1961) describes the modifications that made the Hubble system more three-dimensional: the introduction of the (r) (inner ring) and (s) (pure spiral) subtypes. Continuity even with this characteristic was possible, using the combined subtype (rs). Thus, already by 1961, the Hubble classification system had become much more complicated than it was in 1926 or 1936. The addition of the S0 class was one reason for this, but the (r) and (s) subtypes were another.

In the Hubble-Sandage classification, it became common to denote galaxies on the left part of the Hubble sequence as "early-type" galaxies and those on the right part as "late-type" galaxies. By the same token, Sa and SBa spirals became "early-type spirals" while Sc and SBc spirals became "late-type spirals." Sb and SBb types became known as "intermediate-type spirals." The reason for these terminologies was convenience and borrows terminology often used for stars. Young, massive stars of spectral classes O and B were known as "early-type stars" while older stars of cooler spectral types were known as "late-type stars." Hubble stated that his use of these temporal descriptions for galaxies had no evolutionary implications. An irony in this is that it eventually became clear that early-type galaxies are dominated by late-type stars, while late-type galaxies often have significant numbers of early-type stars.

De Vaucouleurs (1959) took the idea of continuity of galaxy morphology a step further

by developing what he referred to as the *classification volume* (Figure 3). In this revision of the Hubble-Sandage (1961) classification, galaxy morphology represents a continuous sequence of forms in a three-dimensional volume with a long axis and circular cross-sections of varying size. The long axis of the volume is the *stage*, or type, and it represents the long axis of the original Hubble tuning fork. The short axes are the family and the variety, which refer to apparent bar strength and the presence or absence of an inner ring, respectively. In addition to Hubble’s original stages E, Sa, Sb, and Sc, the classification volume includes new stages: late ellipticals: E⁺, “very late” spirals: Sd, “Magellanic spirals”: Sm, and “Magellanic irregulars”: Im. The S0 class is included in the same position along the sequence, between E’s and spirals, but is subdivided into three stages. The characteristics defining individual stages are described further in section 5.2.

The stage is considered the most fundamental dimension of the classification volume because measured physical parameters, such as integrated color indices, mean surface brightnesses, and neutral hydrogen content correlate well with position along the sequence (e. g., Buta et al. 1994). Early-type galaxies tend to have redder colors, higher average surface brightnesses, and lower neutral hydrogen content than late-type galaxies. The family and variety axes of the classification volume indicate the considerable variations in morphology at a given stage. A famous sketch of families and varieties near stage Sb, drawn by de Vaucouleurs himself during a cloudy night at McDonald Observatory circa 1962, is shown in Sandage (1975) and in Figure 1.13 of the dVA. The classification volume is broader in the middle compared to the ends because the diversity of galaxy morphology is largest at stages like S0/a and Sa. Bars and rings are often most distinct and most recognizable at these stages. Such features are not characteristic of E galaxies, so the volume must be narrow at that end. Along the S0 sequence, bars and rings are barely developed among the earliest S0s (S0[−]) and well-developed among the late S0s (S0⁺), thus the volume begins to broaden. Among very late-type galaxies, Sd, Sdm, Sm, and Im, bars are actually very

frequent, but closed rings (r) are not. Thus, the volume narrows at that end as well.

For the purposes of illustrating morphology, blue light digital images converted to units of magnitudes per square arcsecond are used when available. This approach is described in the dVA, and requires calibration of the images, usually based on published photoelectric multi-aperture photometry. In addition, some of the illustrations used (especially in section 15) are from the Sloan Digital Sky Survey or from other sources. These are not in the same units but still provide excellent illustrations of morphology. SDSS color images differ from dVA images mainly in the central regions, where SDSS images sometimes lose detail.

Unlike the dVA, the scope of this article extends beyond the traditional *UBVRI* wavebands. It is only during the past 20 years that significant morphological information has been obtained for galaxies outside these bands, mostly at mid- and far-ultraviolet and mid-IR wavelengths from space-based observatories capable of imaging in these wavelengths to unprecedented depths, providing a new view of galaxy morphology that is only beginning to be explored. A useful review of many issues in morphology is provided by van den Bergh (1998).

5. Galaxy Types: Stage, Family, and Variety

5.1. Elliptical and Spheroidal Galaxies

Elliptical galaxies are smooth, amorphous systems with a continuously declining brightness distribution and no breaks, inflections, zones, or structures, as well as no sign of a disk. Figure 4 shows some good examples. Because ellipticals are dominated by old stars and are relatively dust-free, they look much the same at different wavelengths. Hubble’s subclassification of ellipticals according to apparent ellipticity (E_n , where $n=10(1-b/a)$, b/a being the apparent flattening) was useful but virtually no physical characteristics of

ellipticals correlate with this parameter (Kormendy & Djorgovski 1989). The n value in the E_n classification is simply the projected ellipticity and not easily interpreted in terms of a true flattening without direct knowledge of the orientation of the symmetry planes. Luminous ellipticals are thought to be triaxial in structure with an anisotropic velocity dispersion tensor, while lower luminosity ellipticals are more isotropic oblate rotators (Davies et al. 1983). Studies of rotational to random kinetic energy (V/σ) versus apparent flattening (ϵ) show that massive ellipticals are slow anisotropic rotators. Ellipticals follow a fundamental plane relationship between the effective radius r_e of the light distribution, the central velocity dispersion σ_0 , and mean effective surface brightness $\langle I_e \rangle$ (see review by Kormendy & Djorgovski 1989). Dwarf elliptical galaxies may not follow the same relation as massive ellipticals; this is discussed by Ferguson & Binggeli (1994).

The lack of fundamental significance of Hubble’s E_n classification led some authors to seek an alternative, more physically useful approach. Kormendy & Bender (1996; see also the review by Schweizer 1998) proposed a revision to Hubble’s tuning fork handle that orders ellipticals according to their velocity anisotropy, since this is a significant determinant of E galaxy intrinsic shapes. Velocity anisotropy correlates with the *deviations* of E galaxy isophotes from pure elliptical shapes, measured by the parameter a_4/a , the relative amplitude of the $\cos 4\theta$ Fourier term of these deviations. If this relative amplitude is positive, then the isophotes are pointy, disk-like ovals, while if negative, the isophotes are boxy ovals. A boxy elliptical is classified as $E(b)$, while a disk-like elliptical is classified as $E(d)$. The correlation with anisotropy is such that $E(b)$ galaxies have less rotation on average and more velocity anisotropy than $E(d)$ galaxies.

The Kormendy & Bender proposed classification is shown in Figure 5, together with two exceptional examples that show the characteristic isophote shapes. The leftmost of these two, NGC 7029, is an unusually obvious boxy elliptical at larger radii. This boxiness

is the basis for the classification E(b)5. However, NGC 7029 is not boxy throughout: it shows evidence of a small inner disk and hence is disk-like at small radii. This is not necessarily taken into account in the classification. The other image shown in Figure 5 is NGC 4697, a galaxy whose isophotes are visually disk-like. The idea with the Kormendy & Bender classification is that it is the disk-like ellipticals which connect to S0 galaxies, and not the boxy ellipticals. However, NGC 7029 demonstrates that diskiness and boxiness can be a function of radius, thus perhaps a smooth connection between E(b) and E(d) types [i.e., type E(b,d)] is possible and the order shown in the Kormendy & Bender revision to the Hubble tuning fork, with boxy Es blending into the disk-like Es, could be reasonable.

Note that while the classical E_n classifications of ellipticals were designed by Hubble to be estimated by eye, this is not easily done for the E(b) and E(d) classifications, which are most favored to be seen only when the disk is nearly edge-on. Face-on Es with imbedded disks will not show disk-like isophotes. For example, NGC 7029 and 4697 are extreme cases where the isophotal deviations are obvious by eye. But for most E galaxies, the E(b) n and E(d) n classifications can only be judged reliably with measurements of the a_4/a parameter.

The de Vaucouleurs classification of ellipticals includes a slightly more advanced type called E^+ , or “late” ellipticals. It was originally intended to describe “the first stage of the transition to the S0 class” (de Vaucouleurs 1959). Five examples of E^+ galaxies are shown in the second row of Figure 4. Galaxies classified as E^+ can be the most subtle S0s, but many of the E^+ cases listed in RC3 are the brightest members of clusters that have shallow enough brightness profiles to appear to have an extended envelope (see section 10.6). Of the five E^+ galaxies shown, only NGC 4623 (rare type E^{+7}) seems consistent with de Vaucouleurs’s original view. It is also a much lower luminosity system than the other four cases shown. While $S0^-$ is the type most often confused with ellipticals in visual classification, the bin has a wide spread from the most obvious to the least obvious cases.

Thus, a type like E^+ is still useful for distinguishing transitions from E to S0 galaxies.

The photometric properties of ellipticals depend on luminosity. In terms of Sersic $r^{\frac{1}{n}}$ profile fits, large, luminous ellipticals tend to have profiles described better by $n \gtrsim 4$, while smaller, lower luminosity ellipticals tend to have $n < 4$, with values as low as 1 (e. g., Caon, Capaccioli, & D’Onofrio 1993). Graham & Guzmán (2003) discuss the implications of this correlation on proposed dichotomies of elliptical galaxies (e.g., Kormendy 1985; see also Ferrarese et al. 2006). These studies received a major impetus from the massive photometric analysis of Virgo Cluster elliptical galaxies by Kormendy et al. (2009). Two issues were considered by these authors (Figure 6). The first was whether galaxies classified as dwarf ellipticals (“dE”; see section 15.2) in the Virgo Cluster really are the low luminosity extension of more massive, conventional ellipticals, or something different altogether. Based on parameter correlations, such as $r_{10\%}$, the major axis radius of the isophote containing 10% of the total visual luminosity, versus $\mu_{10\%}$, the surface brightness of this isophote, Kormendy et al. show that even the most elliptical-like and luminous dE galaxies lie on a distinct sequence from normal elliptical galaxies, which tend to lie on a higher density sequence. In a graph of B -band central surface brightness versus absolute B -band magnitude, the dE galaxies lie in a region occupied by Magellanic irregular galaxies, suggesting a link between the groups and consistent with the earlier conclusions of Kormendy (1985). Kormendy et al. (2009) suggest reclassifying Binggeli, Sandage, & Tammann’s (1985) “dE” galaxies and related objects (like dwarf S0, or dS0 galaxies) as “spheroidal” (Sph) galaxies, including the type “Sph,N”, meaning “nucleated spheroidal” galaxy (section 15.2). Figure 6 shows several examples of Sph,N galaxies as compared with several genuine elliptical galaxies. The morphological appearance alone does not necessarily distinguish the two classes. The classification is physical, being based mainly on parameter correlations. Kormendy et al. suggest that Sph galaxies are formed from late-type systems by environmental effects and supernovae.

The second issue considered was the physical distinction between “core” elliptical galaxies, those where the surface brightness profile approaches either a constant level or a slightly sloped level with radius approaching zero, and “coreless” ellipticals (also known as “power law” Es) where the inner profile steepens with decreasing radius (Kormendy 1999). Kormendy et al. (2009) illustrated both types relative to a Sersic $r^{\frac{1}{n}}$ fit to the outer regions of the luminosity profiles. In this representation, core Es are “missing light” relative to the fit while coreless Es have “extra light.” The top row of Figure 6 shows one core E (NGC 4472) and two coreless Es [NGC 4458 and IC 798 (VCC 1440), the latter a low-luminosity dwarf]. The subtle distinctions are evident in these images, with NGC 4472 showing a soft center and NGC 4458 showing a strong center. The terminology for both types is mostly historical (Kormendy 1999) and somewhat counter to the visual impression (i.e., NGC 4472 lacks a bright core while NGC 4458 has one, yet the latter is technically coreless). Kormendy et al. show that core and coreless E galaxies have different Sersic indices, velocity dispersion anisotropy, isophote shapes, and rotational character, with the core Es being of the boxy type and the coreless Es of the disk type in Figure 5. The distinction may be tied to the number of mergers that formed the system.

5.2. S0 and Spiral Galaxies

The full classification of spiral and S0 galaxies involves the recognition of the stage, family, and variety. In de Vaucouleurs’s classification approach, the implication for bars, inner rings, and stages is a continuum of forms (de Vaucouleurs 1959), so that there are no sharp edges to any category or “cell” apart from the obvious ones (for example, there are no galaxies less “barred” than a nonbarred galaxy, nor are there galaxies more ringed than those with a perfectly closed ring).

The classification of S0 galaxies depends on recognizing the presence of a disk and a

bulge at minimum, and usually a lens as well, and no spiral arms. Examples are shown in Figure 7. The display of galaxy images in units of mag arcsec^{-2} makes lenses especially easy to detect, as noted in the dVA. Even if a lens isn’t obvious, a galaxy could still be an S0 if it shows evidence of an exponential disk. (Lenses are also not exclusive to S0s.) The “no spiral arms” characteristic is much stricter in the Hubble-Sandage classification than in the de Vaucouleurs interpretation, because varieties (r, rs, and s) are carried into the de Vaucouleurs classifications of S0s. This allows the possibility of a classification like SA(s)0^- , which would be very difficult to recognize. Bars enter in the classification of S0s in a similar manner as for spirals. Figure 7 shows mainly stage differences among nonbarred and barred S0s. The stage for S0s ranges from early (S0^-), to intermediate (S0^o), and finally to late (S0^+), in a succession of increasing detail. The earliest nonbarred S0s may be mistaken for elliptical galaxies on photographic images, and indeed Sandage & Bedke (1994) note cases where they believe an S0 galaxy has been misclassified as an elliptical by de Vaucouleurs in his reference catalogues (see also *The Revised Shapley-Ames Catalogue*, RSA, Sandage & Tammann 1981). This kind of misinterpretation is less likely for types S0^o and S0^+ , because these will tend to show more obvious structure.

The morphological distinction between E and S0 galaxies has been considered from a quantitative kinematic point of view by Emsellem et al. (2007). These authors argue that the division of early-type galaxies into E and S0 types is “contrived”, and that it is more meaningful to divide them according to a quantitative kinematic parameter called λ_R , the specific angular momentum of the stellar component, which is derived from a two-dimensional velocity field obtained with the SAURON integral field spectrograph (Bacon et al. 2001). Based on this parameter, early-type galaxies are divided into slow and fast rotators, i. e., whether they are characterized by large-scale rotation or not. In a sample of 48 early-types, most were found to be fast rotators classified as a mix of E and S0 types, while the remainder were found to be slow rotators classified as Es. This kind of

approach, which provides a more physical distinction among early-types, does not negate completely the value of the E and S0 subdivisions, but highlights again the persistent difficulty of distinguishing the earliest S0s from Es by morphology alone.

The transition type S0/a shows the beginnings of spiral structure. Two examples are included in Figure 7, one nonbarred and the other barred. Type S0/a is a well-defined stage characterized in the de Vaucouleurs 3D classification volume as having a high diversity in family and variety characteristics. The type received a negative characterization as the “garbage bin” of the Hubble sequence at one time because troublesome dusty irregulars, those originally classified as “Irr II” by Holmberg (1950) and later as “I0” by de Vaucouleurs, seemed to fit better in that part of the sequence. [In fact, de Vaucouleurs, de Vaucouleurs, & Corwin (1976) assigned the numerical stage index $T=0$ to both S0/a and I0 galaxies.] However, this problem is only a problem at optical wavelengths. At longer wavelengths (e.g., 3.6 microns), types such as Irr II or I0 are less needed as they are defined mainly by dust (Buta et al. 2010a).

In general, the stage for spirals is based on the appearance of the spiral arms (degree of openness and resolution) and also on the relative prominence of the bulge or central concentration. These are the usual criteria originally applied by Hubble (1926, 1936). Figure 8 shows the stage sequence for spirals divided according to bar classification (SA, SAB, SB), and as modified and extended by de Vaucouleurs (1959) to include Sd and Sm types. Intermediate stages, such as Sab, Sbc, Scd, and Sdm, are shown in Figure 9. As noted by de Vaucouleurs (1963), these latter stages are almost as common as the basic ones.

The three Hubble criteria are basically seen in the illustrated galaxies. Sa galaxies tend to have significant bulges, and tightly-wrapped and relatively smooth spiral arms. Sab galaxies are similar to Sa galaxies, but show more obvious resolution of the arms. Sb galaxies have more resolution and more open arms, and generally smaller bulges than Sab

galaxies. Sbc galaxies have considerable resolution and openness of the arms, and also usually significant bulges. In Sc galaxies, the bulge tends to be very small and the arms patchy and open. Scd galaxies tend to be relatively bulgeless, patchy armed Sc galaxies. Stage Sd is distinctive mainly as almost completely bulgeless late-type spirals with often ill-defined spiral structure.

Stages Sdm and Sm are the most characteristically asymmetric stages, the latest spiral types along the de Vaucouleurs revised Hubble sequence. They are described in detail by de Vaucouleurs & Freeman (1972) and by Odewahn (1991). Sm is generally characterized by virtually no bulge and a single principle spiral arm. If a bar is present, it is usually not at the center of the disk isophotes, unlike what is normally seen in earlier type barred spirals. This leads to the concept of an *offset barred galaxy*. The single spiral arm emanates from one end of the bar. As noted by Freeman (1975), this is a basic and characteristic asymmetry of the mass distribution of Magellanic barred spirals. Sdm galaxies are similar, but may show a weaker or shorter second arm. In Figure 8, NGC 4618 is an especially good example of an SBm type (Odewahn 1991), while in Figure 9, NGC 4027 is illustrated as type SBdm.

An important issue regarding these galaxies is whether the optically offset bar is also offset from the dynamical rotation center of the disk. In a detailed HI study of the interacting galaxy pair NGC 4618 and 4625, Bush & Wilcots (2004) found very regular velocity fields and extended HI disks, but no strong offset of the rotation center from the center of the bar. This is similar to what Pence et al. (1988) found for the offset barred galaxy NGC 4027, based on optical Fabry-Perot interferometry. In contrast, both Magellanic Clouds, which are also offset barred galaxies, were found to have HI rotation centers significantly offset from the center of the bar (Kerr & de Vaucouleurs 1955).

In general, the application of Hubble’s three spiral criteria allows consistent

classification of spiral types. Nevertheless, sometimes the criteria are inconsistent. For example, small bulge Sa galaxies are described by Sandage (1961) and Sandage & Bedke (1994). Barred galaxies with nuclear rings can have spiral arms like those of an earlier Hubble type and very small bulges. In such conflicting cases, the emphasis is usually placed on the appearance of the arms. Also, while late-type Sdm and Sm galaxies are characteristically asymmetric, other types may be asymmetric as well. On average, the bulge-to-total luminosity ratio is related to Hubble type, but the result is sensitive to how galaxies are decomposed (e. g., Laurikainen et al. 2005). Asymmetry has been quantified by Conselice (1997).

The family classifications SA, SAB, and SB are purely visual estimates of bar strength, for both spirals and S0s. They are highlighted already in Figures 7– 9, but the continuity of this characteristic is better illustrated in Figure 10, where de Vaucouleurs (1963) underline classifications (SAB and SAB) are also shown. An SA galaxy has no evident bar in general, although high inclination can cause a mistaken SA classification if a bar is highly foreshortened. Also, internal dust may obscure a bar (see, e. g., Eskridge et al. 2000). An SB galaxy should have a clear, well-defined bar. The intermediate bar classification SAB is one of the hallmarks of the de Vaucouleurs system, and is used to recognize galaxies having characteristics intermediate between barred and nonbarred galaxies. It is used for well-defined ovals or simply weaker-looking normal bars. The weakest primary bars are denoted SAB while the classification SAB is usually assigned to more classical bars that appear only somewhat weaker than conventional bars. Most of the time, galaxies which should be classified as SAB are simply classified as SB.

Variety is also treated as a continuous classification parameter (Figure 10, second row). A spiral galaxy having a completely closed or very nearly completely closed inner ring is denoted (r). The spiral arms usually break from the ring. If the spiral arms break directly

from the central region or the ends of a bar, forming a continuously winding, open pattern, the variety is (s). The intermediate variety (rs) is also well-defined. Inner rings which appear broken or partial are in this category. The “dash-dot-dash in brackets” morphology: (-o-), where a bar with a bulge is bracketted by spiral arcs overshooting the bar axis, is very typical of variety (rs). The example of this shown in Figure 10 is NGC 4548. We use the notation $\underline{rs}$ to denote an inner ring made up of tightly wrapped spiral arms that do not quite close, while the notation $r\underline{s}$ is used for very open, barely recognizable, inner pseudorings. A good example of the former is NGC 3450, while an example of the latter is NGC 5371.

A *spindle* is a highly inclined disk galaxy. For blue-light images, usually an “sp” after the classification automatically implies considerable uncertainty in the interpretation, because family and variety are not easily distinguished when the inclination is high. Figure 11 shows, however, that stages can be judged reasonably reliably for edge-on galaxies. One important development in the classification of edge-on galaxies has been the ability to recognize edge-on bars through boxy/peanut and “X”-shapes. Boxy/peanut bulges in edge-on galaxies were proven to be bars seen edge-on from kinematic considerations (e. g., Kuijken & Merrifield 1995). This shape is evident in NGC 4425 (Row 1, column 4 of Figure 11; see also section 9).

For spiral and S0 galaxies that are not too highly inclined (i.e., not spindles), once the stage, family, and variety are determined these are combined in the order family, variety, stage for a final full type. For example, NGC 1300 is of the family SB, variety (s), and stage b, thus its full type is SB(s)b. The S0⁺ galaxy NGC 4340 has both a bar and inner ring and its full type is SB(r)0⁺. The classification is flexible enough that if, for example, the family and variety of a galaxy cannot be reliably determined owing to high inclination, while the stage can still be assessed, then the symbols can be dropped and a type such as

“Sb” or “S0” can still be noted.

5.3. Irregular Galaxies

Magellanic irregular galaxies represent the last normal stage of the de Vaucouleurs revised Hubble sequence. Several examples are shown in Figure 12. The objects illustrated in the top row are all examples of (s)-variety irregulars with bars or some trace of a bar. Nevertheless, not all Magellanic irregulars have bars. Irregulars of the lowest luminosities are usually classified simply as Im since the sophistication of structure needed to distinguish something like “family” may not exist for such galaxies.

Irregular galaxies are important for their star formation characteristics. As noted by Hunter (1997), irregulars are similar to spirals in having both old and young stars, as well as dust, atomic, molecular, and ionized gas, but lack the spiral structure that might trigger star formation. Thus, they are useful laboratories for examining how star formation occurs in the absence of spiral arms.

Although irregulars are largely defined by a lack of well-organized structure like spiral arms, the two lower right galaxies in Figure 12 are not so disorganized looking and seem different from the other cases shown. NGC 5253 looks almost like a tilted S0 galaxy, yet it has no bulge at its center nor any obvious lenses. Instead, the central area is an irregular zone of active star formation. The central zone was interpreted by van den Bergh (1980a) as “fossil evidence” for a burst of star formation, possibly triggered by an interaction with neighboring M83. This is a case where the de Vaucouleurs classification of I0 seems reasonable: NGC 5253 is an early-type galaxy with a central starburst, probably the youngest and closest example known (Vanzi & Sauvage 2004). It is a Magellanic irregular galaxy imbedded in a smooth S0-like background known to have an early-type star

spectrum. NGC 1705, also shown in Figure 12, is similar but has a super star cluster near the center and obvious peculiar filaments. It is classified as a blue compact dwarf by Gil de Paz et al. (2003). Both galaxies are classified as Amorphous by Sandage & Bedke (1994).

6. Other Dimensions to Galaxy Morphology

The de Vaucouleurs classification volume recognizes three principal aspects of galaxy morphology, but clearly there are many more dimensions than three. Stage, family, and variety are the dimensions most clearly highlighted in blue light images and have a wide scope. Other dimensions may be considered and for some there is explicit notation in use.

6.1. Outer Rings and Pseudorings

Published de Vaucouleurs types include an extra dimension known as the outer ring/pseudoring classification. Several examples of outer rings and pseudorings are shown in Figure 13. An outer ring is a large, often diffuse structure, typically seen in barred early-type galaxies (stages $S0^+$ to Sa) at a radius approximately twice that of the bar. Closed outer rings are recognized with the type symbol (R) preceding the main part of the classification. For example, an SB(r) 0^+ galaxy having an outer ring has a full classification of (R)SB(r) 0^+ . Interestingly, rare cases of double outer ring galaxies, type (RR), are known, where two detached outer rings are seen; an example is NGC 2273 shown in the upper left frame of Figure 13.

In later-type galaxies, a large outer ring-like feature is often seen made of outer spiral arms whose variable pitch angle causes them to close together. These features are classified as outer pseudorings, symbolized by (R') preceding the main type symbols [e.g., as in (R')SB(r)ab]. Outer pseudorings are mainly observed in Sa to Sbc galaxies, and are only

rarely seen in the very late stages Sc-Sm.

Among bright nearby galaxies, outer rings and pseudorings are found at about the 10% level (Buta & Combes 1996). Typically, outer rings are fainter than 24 mag arcsec⁻² in blue light. With such low surface brightnesses, the rings can be easily lost to Galactic extinction. The division between outer rings and pseudorings is also not sharp. Some outer pseudorings are only barely distinguishable from outer rings. Continuity applies to these features as it does for inner rings although there is no symbol other than “S” for an outer spiral pattern which does not close into an outer pseudoring.

Although closed outer rings (R) are equally well-recognized in the RSA and the Carnegie and Hubble Atlases, outer pseudorings are a unique feature of the de Vaucouleurs revision. The value of recognizing these features is that many show morphologies consistent with the theoretical expectations of the outer Lindblad resonance (OLR, Schwarz 1981), one of the major low-order resonances that can play a role in disk evolution. Resonance rings are discussed further in section 10.1, but Figure 14 shows schematics of the morphologies generally linked to this resonance. The schematics are designed to highlight the subtle but well-defined aspects of these features, while Figure 15 shows images of several examples of each morphology, including the “models” used for the schematic. Outer rings of type R₁ are closed rings that are slightly dimpled towards the bar axis, a shape which connects directly to one of the main periodic orbit families near the OLR as shown in Schwarz (1981) and in the dVA. Outer pseudorings of type R'₁ are similar to type R₁ but are made of two spiral arms that wind approximately 180° with respect to the ends of the bar. Even these will usually show a dimpled shape. Outer pseudorings of type R'₂ are different from this in that two spiral arms wind 270° with respect to the ends of the bar, such that the arms are doubled in the quadrants immediately trailing the bar.

The shapes R₁, R'₁, and R'₂ were predicted by Schwarz (1981) based on “sticky-particle”

numerical simulations. Not predicted by those simulations (but later shown in extensions of those simulations by Byrd et al. 1994 and Rautiainen & Salo 2000) is an interesting combined ring morphology called $R_1R'_2$, which consists of a closed R_1 ring and an R'_2 pseudoring. This combination is especially important because it demonstrates not only a continuity of morphologies among outer rings and pseudorings different from the continuity between outer rings and pseudorings in general, but also it is a morphology that can be linked directly to the dynamics of barred galaxies.

Note that the classification shown in Figures 14 and 15 does not depend on whether the rings are in fact linked to the OLR. The illustrated morphologies are abundant and easily recognized regardless of how they are interpreted. (Section 10.1 discusses other interpretations that have been proposed.) Although the Schwarz models guided the search for these morphologies, Rautiainen, Salo, & Buta (2004) and Treuthardt et al. (2008) showed that some outer pseudorings classified as R'_1 are more likely related to the outer 4:1 resonance and not the OLR. These cases are generally recognizable by the presence of secondary spiral arcs in a four-armed pattern in the area of the bar (NGC 1433 in Figure 1 and ESO 566–24 in Figure 19 are examples).

The OLR subclassifications are used in the same manner as the plain outer ring and pseudoring classifications. For example, NGC 3081 has the full type $(R_1R'_2)SAB(r)0/a$.

6.2. Inner and Outer Lenses

The value of recognizing lenses as significant morphological components was first emphasized by Kormendy (1979), who suggested a dynamical link between inner lenses, which are often filled by a bar in one dimension, and dissolved or dissolving bars. Kormendy noted that lenses can be of the inner or outer type, in a manner analogous to inner and

outer rings. He suggested the notation (l) for inner lenses and (L) for outer lenses to be used in the same position of the classification as inner and outer rings. For example, the galaxy NGC 1543 is type (R)SB(l)0/a while galaxy NGC 2983 is type (L)SB(s)0⁺. Figure 16 demonstrates the continuity between rings and lenses, which is evident not only among barred galaxies but among nonbarred ones as well. This continuity is recognized by the type symbol (rl), also used by Kormendy (1979). This type refers to a low contrast inner ring at the edge of a clear lens. Even underline classifications (rl) and (rl) may be recognized. A rare classification, (r'l), refers to an inner pseudoring/lens, a type of feature that is seen in NGC 4314 and recognized as such in the dVA.

Similarly, Figure 17 shows a continuity between outer rings and outer lenses through the type classification (RL), referring to an outer lens with a weak ring-like enhancement. Underline types RL and RL may also be recognized. The origin of outer lenses could be in highly evolved outer rings.

6.3. Nuclear Rings and Bars

The central regions of barred galaxies often include distinct morphological features in the form of small rings and secondary bars. The rings, known as nuclear rings because of their proximity to the nucleus well inside the ends of the primary bar, are sites of some of the most spectacular starbursts known in normal galaxies. The rings are typically ≈ 1.5 kpc in linear diameter and intrinsically circular in shape. Figure 18 (top row) shows three examples: NGC 1097, 3351, and 4314. These images highlight the small bulges that seem characteristic of nuclear-ringed barred galaxies. The three galaxies illustrated have types ranging from Sa to Sb, but based on the bulge size the types would be considerably later. For example, NGC 3351 has the bulge of an Sd galaxy.

Comerón et al. (2010) carried out an extensive statistical study of nuclear ring radii, and identified a subclass known as “ultra-compact” nuclear rings (UCNRs). Such rings were recognized mainly in Hubble Space Telescope images and are defined to be less than 200pc in diameter. (See Figure 26 for an example in NGC 3177.) Comerón et al. showed that UCNRs are the low size tail of the global nuclear ring population. This study also showed that bar strength impacts the sizes of nuclear rings, with stronger bars generally hosting smaller nuclear rings than weaker bars.

Comerón et al. (2010) were also able to derive a reliable estimate of the relative frequency of nuclear rings as $20\% \pm 2\%$ over the type range $S0^-$ to Sd, confirming with smaller error bars the previous result of Knapen (2005). Assuming that nuclear rings are a normal part of galaxy evolution, these authors argue that the rings may survive for 2-3 Gyr. Interestingly, it was also found that $19\% \pm 4\%$ of nuclear rings occur in nonbarred galaxies, implying either that the rings may have formed when a bar was stronger (evidence of bar evolution) or that ovals or other mechanisms can lead to their formation. Mazzuca et al. (2009; see also Knapen 2010) connect some of the properties of nuclear rings to the rate at which the rotation curve rises in the inner regions.

The most extreme nuclear ring known is found in the SBa galaxy ESO 565–11 (see also section 7). At 3.5kpc in diameter, not only is it one of the largest known nuclear rings, but also the ring has an extreme elongated shape compared to more typical nuclear rings.

Nuclear bars lie in the same radial zone as nuclear rings and sometimes lie inside a nuclear ring. Three examples are shown in the second row of Figure 18. These average about one-tenth the size of a primary bar. There is no preferred angle between the axis of the nuclear bar and the primary bar, suggesting that the two features have different pattern speeds (Buta & Combes 1996; dVA).

Neither nuclear rings nor nuclear bars were recognized in the original Hubble-Sandage-de

Vaucouleurs classifications, presumably in part because the use of small-scale photographic plates for extensive galaxy classification limited the detectability of the features in the (typically) overexposed centers. Modern multi-band digital imaging greatly facilitates the detection of the small rings and bars, allowing their inclusion in the classification. Buta & Combes (1996) and Buta et al. (2010a) suggested the notation nr for nuclear rings and nb⁴ for nuclear bars, respectively, to be used as part of the variety classification as in, for example, SB(r,nr)b for NGC 3351, or SAB(l,nb)0/a for NGC 1291. Continuity may exist for these features like other rings and primary bars. [For example, nuclear lenses (nl) may also be recognized.] In blue light images, the appearance of the central region of a barred galaxy can be strongly affected by dust. For example, NGC 1365 shows a nuclear spiral in blue light, while in the infrared, the morphology is that of a nuclear ring (Buta et al. 2010a). The morphologies of some galaxies have a full complement of classifiable features. For example, accounting for all the rings and bars seen in NGC 3081, the classification is (R₁R'₂)SAB(r,nr,nb)0/a.

Lisker et al. (2006) use the terminology “S2B” for double-barred galaxies, a reasonable alternative approach to classifying these objects. Lisker et al. successfully identified nuclear bars in galaxies at redshifts $z=0.10-0.15$ (from HST ACS observations), the most distant ones recognized thus far.

6.4. Spiral Arm Morphologies

A classification such as “Sb” tells one that a galaxy is a spiral of moderate pitch angle and degree of resolution of the arms, and that a significant bulge may be present. The type

⁴In a study of galactic nuclei, van den Bergh (1995) proposed the notation “NB” for nuclear bars, although what he refers to are not the same as the features described here.

does not directly tell: (1) the multiplicity of the spiral pattern; (2) the character of the arms (massive, filamentary, grand design, or flocculent); or (3) the sense of winding of the arms (leading or trailing the direction of rotation). These are nevertheless additional dimensions to galaxy morphology.

The multiplicity of the spiral pattern refers to the actual number of spiral arms, usually denoted by the integer m . Examples of spirals having $m=1$ to 5 are illustrated in Figure 19. The multiplicity is not necessarily straightforward to determine and may be a function of radius. For example, a spiral may be two-armed in the inner regions and multi-armed in the outer regions. Spirals of low m are usually *grand design*, a term referring to a well-defined global (meaning galaxy-wide) pattern of strong arms. The typical grand design spiral has two main arms, as in NGC 5364 (lower left frame of Figure 19). In contrast, a flocculent spiral has piecewise continuous arms but no coherent global pattern (Elmegreen 1981). NGC 5055 is an example shown in the middle left frame of Figure 19. This category is relevant mainly to optical wavebands. In the infrared, an optically flocculent spiral like NGC 5055 reveals a more coherent global grand design spiral (Thornley 1996; see also Figure 44), indicating that dust is partly responsible for the flocculent appearance.

The terms “massive” and “filamentary” arms are due to Reynolds (1927) and are discussed by Sandage (1961, 1975). Massive arms are broad, diffuse, and of relatively low contrast, as in M33, while filamentary arms are relatively thin in comparison, and lined by knots or filaments, as in NGC 5457 (M101). De Vaucouleurs (1956) originally used these distinctions as part of his classification, but later dropped the references to spiral arm character probably because of the complexity it added to his types.

Elmegreen & Elmegreen (1987) used a different approach to spiral arm character by recognizing a series of spiral *arm classes* based on arm continuity and length (but not necessarily contrast). Ten classes ranging from flocculent (ACs 1-4) to grand design (5-12;

numbers 10 and 11 were later dropped). Examples of each are illustrated in Figure 20 (see Elmegreen & Elmegreen 1987 for a description of each class). Thus, spiral character is a well-developed additional dimension to galaxy classification. A simpler approach advocated by Elmegreen & Elmegreen is “G” for grand-design, “F” for flocculent, and “M” for multiple-armed. The arms of grand design spirals are in general thought to be density waves and may in fact represent quasi-steady wave modes (e.g., Bertin et al. 1989; Zhang 1996, 1998, 1999), although there is also some evidence that spirals may be transient (see review by Sellwood 2010). Flocculent spirals may be sheared self-propagating star formation regions (Seiden & Gerola 1982).

Figure 19 also shows two examples of a new class of spirals, called *counter-winding* spirals. In these cases, an inner spiral pattern winds outward in the opposite sense to an outer spiral pattern. In the case of NGC 4622 (row 2, middle), the inner pattern has only a single arm and the outer pattern has two arms, while in NGC 3124 (row 2, middle right), the inner pattern is two-armed while the outer pattern is at least four-armed. The two cases are very different because NGC 4622 is essentially nonbarred while in NGC 3124, the inner spiral is classified as a bar. The presence of oppositely winding spiral patterns in the same galaxy means that one set of arms is trailing (opening opposite the direction of rotation) while the other set is leading (opening into the direction of rotation). In general, studies of the dust distribution as well as the rotation of spirals has shown that trailing arms are the rule (de Vaucouleurs 1958). Surprisingly, straightforward analysis of a velocity field and the dust pattern in NGC 4622 led Buta, Byrd, & Freeman (2003) to conclude that the strong outer two-armed pattern in this galaxy is leading, while the inner single arm is trailing. This led to the characterization of NGC 4622 as a “backwards spiral galaxy,” apparently rotating the wrong way. An additional nonbarred counter-winding spiral has been identified in ESO 297–27 by Grouchy et al. (2008). In this case, the same kind of analysis showed that an inner single arm leads while a 3-armed outer pattern trails. No comparable analysis

has yet been made for NGC 3124.

Vaisanen et al. (2008) have shown that a two-armed (but not counter-winding) spiral in the strongly interacting galaxy IRAS 18293-3413 is leading. Even with this, the number of known leading spirals is very small (dVA). Leading spirals are not expected to be as long-lived as trailing spirals since they do not transfer angular momentum outwards and this is needed for the long-term maintenance of a spiral wave (Lynden-Bell & Kalnajs 1972).

An interesting example of leading “armlets” was described by Knapen et al. (1995a), who used K -band imaging of the center of the grand design spiral M100 to reveal details of its nuclear bar and well-known nuclear ring/spiral. The nuclear bar has a leading twist that connects it to two bright K -band “knots” of star formation. This morphology was interpreted in terms of the expectations of gas orbits in the vicinity of an inner Lindblad resonance (ILR; Knapen et al. 1995b).

The final galaxy in Figure 19 is NGC 4921, an example of an *anemic* spiral. This is a type of spiral that is deficient in neutral atomic hydrogen gas, and as a consequence it has a lower amount of dust and star formation activity. The arms of NGC 4921 resemble those of an Sb or Sbc galaxy in pitch angle and extensiveness, but are as smooth as those typically seen in Sa galaxies. Anemic spirals were first recognized as galaxies with “fuzzy” arms (see van den Bergh 1998) where star formation has been suppressed due to ram-pressure stripping in the cluster environment. In the case of NGC 4921, the environment is the Coma Cluster. The idea is that such galaxies will eventually turn into S0 galaxies (van den Bergh 2009a). Anemic spiral galaxies are further discussed in section 10.2.

Seigar et al. (2008) have demonstrated the existence of a correlation between spiral arm pitch angles and supermassive central black hole masses. The sense of the correlation is such that black hole mass is highest for the most tightly wound spirals and lowest for the most open spirals. The correlation is expected because black hole mass is tightly correlated

to bulge mass and central mass concentration, and spiral arm pitch angle is tied to shear in galactic disks, which itself depends on mass concentration (Seigar et al. 2005).

6.5. Luminosity Effects

Luminosity effects are evident in the morphology of galaxies through surface brightness differences between giants and dwarfs, and through the sophistication of structure such as spiral arms. van den Bergh (1998) describes his classification system which takes luminosity effects into account using a set of luminosity classes that are analogous to those used for stars. The largest, most massive spirals have long and well-developed arms, while less massive spirals have less well-defined arms.

The nomenclature for the classes parallels that for stars: I (supergiant galaxies), II (bright giant galaxies), III (giant galaxies), IV (subgiant galaxies) and V (dwarf galaxies). Intermediate cases I-II, II-III, III-IV, and IV-V, are also recognized.

Figure 21 shows galaxies which van den Bergh (1998) considers primary luminosity standards of his classification system. The original van den Bergh standards for these classes were based on the small scale paper prints of the Palomar Sky Survey. Sandage and Tammann (1981) adopted the precepts of the van den Bergh classes but revised the standards based on large-scale plates. In general, luminosity class I galaxies have the longest, most well-developed arms, luminosity class III galaxies have short, patchy arms extending from the main body, while luminosity class V galaxies have very low surface brightness and only a hint of spiral structure. The classes are separated by type in Figure 21 because among Sb galaxies, few are of luminosity class III or fainter, while among Sc and later type galaxies, the full range of luminosity classes is found. van den Bergh does not use types like Sd or Sm for conventional de Vaucouleurs late-types, but instead uses S[−] and

S^+ to denote “early” (smoother) and “late” (more patchy) subgiant spirals. Similarly, van den Bergh uses Sb^- and Sb^+ to denote “early” and “late” Sb spirals, respectively. (Some of these would be classified as Sab and Sbc by de Vaucouleurs.) According to the standards listed by van den Bergh (1998), an Sb I galaxy is 2-3 mag more luminous than an Sb III galaxy, while an Sc I galaxy is more than 4 mag more luminous than an S V galaxy.

7. The Morphology of Galactic Bars and Ovals

Bars are among the most common morphological features of disk-shaped galaxies. Unlike spiral arms, bars cross the “spiral-S0 divide” in the Hubble sequence and are abundant among spirals (at the 50-70% level) when both SAB and SB types are considered (de Vaucouleurs 1963; Sellwood & Wilkinson 1993). The bar fraction has cosmological significance (Sheth et al. 2008), and many estimates of the nearby galaxy bar fraction have been made from both optical and IR studies (see Buta et al. 2010a for a summary of recent work).

Bars are fairly well-understood features of galaxy morphology that have been tied to a natural instability in a rotationally supported stellar disk (see review by Sellwood & Wilkinson 1993). The long-term maintenance of a bar in a mostly isolated galaxy is thought to depend on how effectively it transfers angular momentum to other galaxy components, such as the halo (Athanasoula 2003). Bars are thought to be transient features that, in spiral galaxies, may dissolve and regenerate several times over a Hubble time (Bournaud & Combes 2002). Alternatively, bars may be long-lived density wave modes that drive secular evolution of both the stellar and gaseous distributions (Zhang & Buta 2007; Buta & Zhang 2009). The possible secular evolution of bars in $S0$ galaxies is discussed by Buta et al. (2010b). Bars are also thought to drive spiral density waves (Kormendy & Norman 1979; Buta et al. 2009; Salo et al. 2010).

The actual morphology of bars shows interesting variations that merit further study. The family classifications SAB and SB indicate some measure of bar strength, but do not allude to the varied appearances of bars even among those only classified as SB. Regular bars, such as those illustrated in Figure 8, are the conventional types that define the SB class. Figure 22 shows “ansae”-type bars, referring to bars which have “handles” or bright enhancements at the ends. Martinez-Valpuesta et al. (2007) carried out a statistical study and found that ansae are present in $\approx 40\%$ of early-type barred galaxies and are very rare for types later than stage Sb. Ansaes are usually detectable in direct images, but their visibility can be enhanced using unsharp-masking (all the right frames for each galaxy in Figure 22). Morphologically, ansae may be small round enhancements like those seen in NGC 5375 and 7020, but in some cases, ansae are approximately linear enhancements, giving the bar a parallelogram appearance as in NGC 7098, or curved arcs, giving the bar a partial ring appearance as in NGC 1079. Color index maps in the dVA show that ansae are generally as red as the rest of the bar, indicating the features are stellar dynamical in origin, rather than gas-dynamical. Nevertheless, ansae made of star-forming regions are known. Martinez-Valpuesta et al. (2007) illustrate the case of NGC 4151, a well-known Seyfert 1 galaxy with a strong bar-like inner oval. The appearance of this galaxy’s ansae in the $1.65\mu\text{m}$ H -band is shown in the lower right frames of Figure 22, where the ansae are seen to have irregular shapes compared to the others shown.

Another subtlety about bars is their general boxy character. Athanassoula et al. (1990) showed that generalized ellipses fit the projected isophotes of bars better than do normal ellipses. For 11 or 12 SB0 galaxies examined in this study, a significant degree of boxiness was found near the bar semi-major axis radius.

The unsharp-masked image of NGC 7020 in Figure 22 shows an X-shaped pattern in the inner regions that is the likely signature of a significantly three-dimensional bar. NGC

1079 and 5375 shows hints of similar structure. The X-pattern is expected to be especially evident in edge-on galaxies which show the extended vertical structure of bars. Many examples have been analyzed (Bureau et al. 2006; see also the dVA). Buta et al. (2010a) have suggested that edge-on bars recognized from the X-pattern be denoted “SB_x.”

The cause of bar ansae is uncertain. In simulations, Martinez-Valpuesta et al. (2006) found that ansae form late, after a second bar-buckling episode in a disk model with a live axisymmetric halo, and appear as density enhancements in both the face-on and edge-on views.

Figure 23 shows three examples of galaxies having oval inner disks. These features are described in detail by Kormendy and Kennicutt (2004=KK04), who present both photometric and kinematic criteria for recognizing them. The images in Figure 23 are optical and have been cleaned of foreground and background objects, and have also been deprojected based on the mean shape and major axis position angle of faint outer isophotes. In all three cases, the presence of an outer ring allows clear recognition of the oval shape, assuming that the inner and outer structures are in the same plane. The upper panels of Figure 23 show the full morphology with the outer rings, while the lower panels show the bright oval inner disks. The shapes of the oval disks are varied and range from axis ratio 0.84 for NGC 4736 to 0.55 for NGC 1808. The most striking example is NGC 4941, whose oval disk includes a bright, normal-looking spiral pattern with isophotal axis ratio 0.68. Many other examples are provided by KK04.

The ovals appear to play a bar-like role in these galaxies. The outer rings may be resonant responses to the nonaxisymmetric potential of the ovals, which clearly harbor a great deal of mass in spite of the mildness of their departures from axisymmetry. As noted by KK04, oval disk galaxies are expected to evolve secularly in much the same manner as typical barred galaxies. On the other hand, ovals themselves could be products of bar

secular evolution. Laurikainen et al. (2009) found that the near-IR bar fraction in S0 galaxies is significantly less than that in S0/a or early-type spiral galaxies (also found by Aguerri et al. 2009 in the optical), while the oval/lens fraction is higher, suggesting that some ovals/lenses might be dissolved bars. Further evidence that bars might be dissolving in some galaxies is the detection of extremely weak bars in residual images of visually nonbarred S0 galaxies where a two-dimensional decomposition model has been subtracted. Such a bar is detected in the SA0^o galaxy NGC 3998 (Laurikainen et al. 2009). Aguerri et al. (2009) suggest that central concentration is a key factor in bar evolution, and that a unimodal distribution of bar strengths argues against the idea that bars dissolve and reform (Bournaud & Combes 2002).

Regular barred galaxies also often include an oval bounded by an elongated inner ring. The deprojected blue light images of two examples are shown in Figure 24. NGC 1433 has a very strong normal bar and one of the most intrinsically elongated inner rings known. The inner ring lies at the edge of an oval which is more conspicuous at longer wavelengths. In NGC 1433, the inner ring, the oval, and the bar are all aligned parallel to each other. The situation is different in ESO 565–11, whose bright oval is strongly misaligned with a prominent bar, but similar to NGC 1433, the oval is bounded by an inner pseudoring. The suggestion in this case is that the bar and the oval are independent patterns.

8. Dust Morphologies

Dust lanes are often the most prominent part of the interstellar medium detectable in an optical image of a galaxy. Figure 25 shows different classes of dust lanes, using direct optical images on the left for each galaxy, and a color index map on the right. The color index maps are coded such that blue features are dark while red features (like dust lanes) are light.

The bars of intermediate (mainly Sab to Sbc) spirals often show *leading* dust lanes, that is, well-defined lanes that lie on the leading edges of the bars, assuming the spiral arms trail. The example shown in Figure 25, NGC 1530, has an exceptionally strong bar and the lanes are very straight, regular, and well-defined. These dust lanes are a dynamical effect associated with the bar. The lanes may be curved or straight. Athanassoula (1992) derived models of bar dust lanes and tied the curvature to the strength of the bar in the sense that models with stronger bars developed straighter dust lanes. Comerón et al. (2009) recently tested this idea by measuring the curvature of actual dust lanes as well as quantitative values of the bar strengths for 55 galaxies. They found that strong bars can only have straight dust lanes, while weaker bars can have straight or curved lanes.

In the same manner as bars, a strong spiral often has dust lanes on the concave sides of the inner arms. This is shown for NGC 1566 in the upper right panels of Figure 25. Both bar and spiral dust lanes are face-on patterns. Another type of face-on pattern is the *dust ring*. The inner dust ring of NGC 7217 is shown in the right, middle frames of Figure 25, and it appears as the dark, inner edge of a stellar ring having the same shape. Dust rings can also be detected in more inclined galaxies.

An inclined galaxy with a significant bulge also can show another dust effect: in such a case, the bulge is viewed through the dust layer on the near side of the disk, while the dust is viewed through the bulge on the far side of the disk. This leads to a reddening and extinction asymmetry across the minor axis such that the near side of the minor axis is more reddened and extinguished than the far side. In conjunction with rotation data, this near side/far side asymmetry was used by Hubble (1943) and de Vaucouleurs (1958) to show that most spirals trail the direction of rotation.

The lower frames of Figure 25 show the planar dust lanes seen in edge-on spiral galaxies. The lane in NGC 7814 (lower left frames) is red which indicates that the galaxy

is probably no later in type than Sa. This is consistent with the large bulge seen in the galaxy. However, the planar dust lane seen in NGC 891, type Sb, has a thin blue section in the middle of a wider red section. The blue color is likely due to outer star formation that suffers relatively low extinction. Some individual star forming regions can be seen along the dust lane. In spite of the blue color, we are only seeing the outer edge of the disk in the plane.

Also related to galactic dust distributions are observations of *occulting galaxy pairs*, where a foreground spiral galaxy partly occults a background galaxy, ideally an elliptical (White & Keel 1992). With such pairs, one can estimate the optical depth of the foreground dust, often in areas where it might not be seen easily in an isolated spiral. An excellent example is described by Holwerda et al. (2009), who are able to trace the dust distribution in an occulting galaxy to 1.5 times than the standard isophotal radius.

Another way of illustrating the dust distribution in galaxies is with *Spitzer Space Telescope* Infrared Array Camera (IRAC) images at $8.0\mu\text{m}$ wavelength. This is discussed further in section 12.

9. The Morphologies of Galactic Bulges

A bulge is a very important component of a disk galaxy. In the context of structure formation in a cold dark matter (CDM) cosmology, bulges may form by hierarchical merging of disk galaxies, a process thought to lead to elliptical galaxies if the disks have approximately equal mass. Bulges formed in this way should, then, resemble elliptical galaxies, especially for early-type spirals. The bulges of later-type spirals, however, can be very different from the expectations of a merger-built bulge (also known as a “classical” bulge). In many cases, the bulge appears to be made of material associated with the disk.

KK04 reviewed the concept of “pseudobulges,” referring to galaxy bulges that may have formed by slow secular movement of disk gas to the central regions (also known as disk-like bulges; Athanassoula 2005). The main driving agent for movement of the gas is thought to be bars, which are widespread among spiral galaxies and which exert gravity torques that can move material by redistributing the angular momentum. Inside the corotation resonance, where the bar pattern speed equals the disk rotation rate, gas may be driven into the center to provide the raw material for building up a pseudobulge. KK04 review the evidence for such processes and argue that pseudobulges are a strong indication that secular evolution is an important process in disk-shaped galaxies.

Figure 26 shows the morphologies of both classical bulges and pseudobulges. The four classical bulge galaxies shown in the lower row, M31, NGC 2841, M81, and M104, have bright smooth centers and no evidence for spiral structure or star formation. Classical bulges also tend to have rounder shapes than disks, and can have significant bulge-to-total luminosity ratios as illustrated by M104. Classical bulges are also more supported by random motions than by rotation. Many references to classical bulge studies are given by KK04. Formation mechanisms of such bulges are discussed in detail by Athanassoula (2005).

The two upper rows of Figure 26 are all pseudobulges as recognized by KK04. The first row shows HST wide V -band (filter F606W) images of the inner 1-1.3 kpc of four galaxies, NGC 3177, 4030, 5377, and 1353, in the type range Sa-Sbc. The areas shown account for much of the rise in surface brightness above the inward extrapolation of the outer disk light in these galaxies, and would be considered bulges just on this basis. The HST images show, however, considerable spiral structure, dust, small rings, and likely star formation in these regions, characteristics not expected for a classical bulge. KK04 argue that instead these are pseudobulges that are highly flattened, have a projected shape similar to the outer disk

light, have approximately exponential brightness profiles (Sersic index $n \approx 1-2$), and have a high ratio of ordered rotation to random motions. KK04 argue that a low Sersic index compared to $n=4$ appears to be the hallmark of these pseudobulges, and a signature of secular evolution.

The second row in Figure 26 shows other kinds of pseudobulges discussed by KK04. NGC 6782 and 3081 (two left frames) have secondary bars, and KK04 considered that such features indicate the presence of a pseudobulge because bars are always disk features. In each case, the secondary bar lies inside a nuclear ring.

The other two galaxies in the second row of Figure 26, NGC 128 and 1381, are examples of boxy or box-peanut bulges. These features have been linked to the vertical heating of bars, and if this is what they actually are, then KK04 argue that boxy and box-peanut bulges are also examples of pseudobulges. However, boxy and box/peanut bulges would *not* necessarily be the result of slow movement of gas by bar torques, and subsequent star formation in the central regions, but instead would be related to the orbital structure of the bar itself (Athanassoula 2005).

Recent studies have shown that pseudobulges are the dominant type of central component in disk galaxies. Although originally thought to be important only for late-type galaxies, Laurikainen et al. (2007) showed that pseudobulges are found throughout the Hubble sequence, including among S0-S0/a galaxies, based on sophisticated two-dimensional photometric decompositions. Such galaxies frequently have nuclear bars, nuclear disks, or nuclear rings. Laurikainen et al. also found that bulge-to-total (B/T) flux ratios are much less than indicated by earlier studies, especially for early Hubble types, and that the Sersic index averages $\lesssim 2$ across all types. The lack of gas in S0 and S0/a galaxies complicates the interpretation of their pseudobulges in terms of bar-driven gas flow and subsequent star formation. Instead, Laurikainen et al. link the pseudobulges in early-type galaxies to the

evolution of bars. Laurikainen et al. (2010) also showed that S0s can have pseudobulges if they are stripped spirals, without invoking any bar-induced evolution.

10. Effects of Interactions and Mergers

Galaxy morphology is replete with evidence for gravitational interactions, ranging from minor, distant encounters, to violent collisions and major/minor mergers. Many of the most puzzling and exotic morphologies can be explained by interactions, and even sublimely normal galaxies, like ordinary ellipticals, have been connected to catastrophic encounters. Up to 4% of bright nearby galaxies are involved in a major interaction (Knapen & James 2009). In clusters, other types of interactions may occur, such as gas stripping and truncation of the star-forming disk. In this section, a variety of the types of morphologies that may be considered the results of external interactions are described and illustrated.

10.1. Normal versus Catastrophic Rings

The three types of rings described so far, nuclear, inner, and outer rings, are aspects of the morphology of relatively normal, undisturbed galaxies. Inner rings and pseudorings are found in more than 50% of normal disk galaxies (Buta & Combes 1996), while outer rings and pseudorings are found at the 10% level. The latter rings could be more frequent because their faintness may cause them to go undetected, which is less likely to occur for inner rings. As has been noted, nuclear rings are found at the 20% level (Comerón et al. 2010). The high abundance of these types of ring features suggests that they are mainly products of *internal* dynamics, and in fact all three ring types have been interpreted in terms of internal processes in barred galaxies. The main interpretation of these kinds of rings has been in terms of orbital resonances with the pattern speed of a bar, oval, or

spiral density wave. Resonances are special places where a bar can secularly gather gas owing to the properties of periodic orbits (Buta & Combes 1996). Buta (1995) showed that the intrinsic shapes and relative bar orientations of inner and outer rings and pseudorings supports the resonance interpretation of the features. Schwarz (1981) suggested the outer Lindblad resonance for outer rings and pseudorings, while Schwarz (1984) suggested the inner 4:1 ultraharmonic resonance for inner rings and pseudorings, and the inner Lindblad resonance for nuclear rings. Knapen et al. (1995b) and Buta & Combes (1996) provide further insight into these interpretations.

The resonance idea may only be valid in the case of weak perturbations. In the presence of a strong perturbation, the concept of a specific *resonance radius* can break down, although the idea of a broad *resonance region* could still hold (Contopoulos 1996). Regan and Teuben (2003, 2004) argue that nuclear rings and inner rings are better interpreted in terms of orbit transitions, that is, regions where periodic orbits transition from one major orbit family to another, as in the transition from the perpendicularly-aligned x_2 family to the bar-aligned x_1 family (Contopoulos & Grosbol 1989).

Normal rings have also been interpreted in terms of “invariant manifolds” which emanate from the unstable L_1 and L_2 Lagrangian points in the bar potential (Romero-Gómez et al. 2006, 2007; Athanassoula et al. 2009a,b). This approach has also had some success in predicting the shapes and orientations of inner and outer rings, such as the R_1 , R'_1 , $R_1R'_2$, and R'_2 morphologies shown in Figure 14 and Figure 15. A morphology called “ rR_1 ”, which includes an oval inner ring and a figure eight-shaped R_1 ring (see NGC 1326 in Figure 15), is especially well-represented by this kind of model. The manifolds are tubes which guide orbits escaping the L_1 and L_2 regions. Note that in this interpretation, outer rings are not necessarily associated with the OLR (Romero-Gómez et al. 2006).

Although the vast majority of the ring-like patterns seen in galaxies are probably of

the resonance/orbit-transition/invariant-manifold type, other classes of rings are known that are likely the result of more catastrophic processes, such as galaxy collisions. Figure 27 shows resonance rings in comparison to three other types: accretion rings, polar rings, and collisional rings (the latter commonly referred to as “ring galaxies”). The three accretion rings shown, in Hoag’s Object (Schweizer et al. 1987), IC 2006 (Schweizer et al. 1989), and NGC 7742 (de Zeeuw et al. 2002) are thought to be made of material from an accreted satellite galaxy. For IC 2006 and NGC 7742, the evidence for this is found in *counter-rotation*: the material in the rings counter-rotates with respect to the material in the rest of the galaxies. In Hoag’s Object and IC 2006, the accreting galaxy is a normal E system.

Polar rings are also accreted features except that the accreting galaxy is usually a disk-shaped system, most often an S0 (Whitmore et al. 1990). In these cases, the accreted material comes in at a high angle to the plane of the disk. The configuration is most stable if the accretion angle is close to 90° , or over the poles of the disk system. This limits the ability of differential precession to cause the ring material to quickly settle into the main disk. The polar feature can be a ring or simply an inclined and extended disk. Whitmore et al. (1990) presented an extensive catalogue of probable and possible polar ring galaxies.

The main example illustrated in Figure 27 is NGC 4650A, where the inner disk component is an S0. Galaxies like NGC 4650A have generated considerable research because polar rings probe the shape of the dark halo potential (e. g., Sackett et al. 1994). The galaxies are also special because the merging objects have retained their distinct identities, when most mergers lead to a single object. Brook et al. (2008) link the misaligned disks of polar ring galaxies to the process of hierarchical structure formation in a cold dark matter scenario.

While polar rings are most easily recognizable when both disks are nearly edge-on to us,

cases where one or the other disk is nearly face-on have also been recognized. One example, ESO 235–58 (Buta & Crocker 1993) is shown in the middle-right panel of Figure 27. In this case, the inner component is almost exactly edge-on and shows a planar dust lane, and is likely a spiral rather than an S0. The ring component is inclined significantly to the plane of this inner disk but may not be polar. The faint outer arms in this component caused ESO 235–58 to be misclassified as a late-type barred spiral in RC3. Spiral structure in polar disks has been shown to be excitable by the potential of the inner disk, which acts something like a bar (Theis, Sparke, & Gallagher 2006).

An example where the main disk is seen nearly face-on is NGC 2655 (Sparke et al. 2008). In this case, the polar ring material is seen as silhouetted dust lanes at an uncharacteristic angle to the inner isophotes. NGC 2655 also shows evidence of faint shells/ripples, indicative of a recent merger (section 10.3.3). Sil’chenko & Afanasiev (2004) have discussed NGC 2655 and other similar examples of inner polar rings in terms of the triaxiality of the potential.

Also illustrated in Figure 27 is NGC 660, which was listed as a possible polar ring galaxy by Whitmore et al. (1990). Like ESO 235–58, NGC 660 has an aligned dust lane in its inner disk component, which thus is likely to be a spiral, not an S0. The extraplanar disk is actually far from polar, being inclined only 55° (van Driel et al. 1995). A recent study of massive stars in the ring is given by Karataeva et al. (2004).

Collisional ring galaxies (Arp 1966; Appleton & Struck-Marcell 1996) are thought to be cases where a larger galaxy suffers a head-on collision with a smaller galaxy down its polar axis. The collision causes an expanding density wave of massive star formation, and multiple rings are possible. Three examples are shown in Figure 27. Theys & Spiegel (1976) have discussed various classes of ring galaxies. Arp 147 (Arp 1966) is an example of type “RE”, referring to a sharp elliptical ring with an empty interior. The Cartwheel (Higdon

1995) and the Lindsay-Shapley ring (Arp & Madore 1987) are examples of type “RN”, meaning an elliptical ring with an off-center nucleus. Not shown in Figure 27 is a third category called “RK”, where a single, large knot lies on one side of the ring, making the system very asymmetric.

Madore, Nelson, & Petrillo (2009) have published a comprehensive atlas of all known likely collisional ring galaxies, many taken from the catalogue of Arp & Madore (1987). Based on this study, only 1 in 1000 galaxies is a collisional ring galaxy. For entry, the Madore et al. atlas requires at least two objects in the immediate vicinity of the ring that might plausibly be the intruder galaxy. Most of the rings are not in cluster environments, however. The atlas also brings attention to several double-ring collisional systems, which have been predicted by numerical simulations (see Struck 2010 for a review). The unusual radial “spokes” in the Cartwheel, a feature not seen in any other collisional ring galaxy, could be related to interactive accretion streams (Struck et al. 1996).

Romano, Mayya, & Vorobyov (2008) present images of several ring galaxies that show the pre-collision stellar disk. They also show that rings are generally delineated by blue knots and that the off-centered nuclei are usually more yellow in color. In addition, some of the companion galaxies show diffuse asymmetric outer light suggesting that they are being stripped.

Figure 27 shows that accretion rings can account for some of the rings seen in nonbarred galaxies. Buta & Combes (1996) argue that a bar is an essential element in resonance ring formation. ESO 235–58 shows that a polar ring-related system can resemble a ringed, barred galaxy. The three collisional rings are all very distinctive from the others.

10.2. Environmental Effects on Star-Forming Disks

Galaxy clusters are excellent laboratories for detecting the effects of environment on galaxy morphology and structure. Frequent mergers and environmental conversion of spirals into S0s are thought to be at the heart of the morphology-density relation, where early-type galaxies dominate cluster cores, and spirals and irregulars are found mainly in the outer regions (Dressler 1980; van der Wel et al. 2010).

The issue of environmental effects has a direct bearing on how we might interpret the Hubble sequence. For example, the continuity of galaxy morphology certainly seems apparent from the discussions in previous sections of this review. The Hubble sequence E-S0-Sa-Sb-Sc-I appears physically significant when total colors, mean surface brightnesses, and HI mass-to-blue light ratios are considered, and the way features are recognized in the classification systems also favors the continuity. Morphological continuity does *not*, however, automatically imply that the galaxy types are in fact ordered correctly. For example, although Hubble placed S0s as a transition type between elliptical galaxies and spirals, this placement has been questioned by van den Bergh (1998, 2009a). Based on a statistical analysis of types given in the RSA, van den Bergh showed that S0 galaxies are typically 0.8-1.0 mag less luminous than E and Sa galaxies, implying that S0 galaxies, on the whole, cannot really be considered intermediate between E and Sa galaxies.⁵ The preponderance of S0 galaxies in clusters led to the early suggestion (e.g., Spitzer & Baade 1951; Gunn & Gott 1972; Moore et al. 1996) that some type of external environmental interaction

⁵ In contrast to van den Bergh’s study of RSA S0 galaxies, Laurikainen et al. (2010) found that the absolute K_s -band magnitudes of a well-defined sample of S0s are similar to those of early-type spirals in the OSUBSGS sample. The sample was mostly drawn from RC3 and includes some galaxies classified as ellipticals in RC3 and as S0s in the RSA (see section 12).

was responsible for stripping a spiral galaxy of its interstellar medium. If this actually occurred, then, as suggested by van den Bergh (2009a), this could imply that S0 galaxies have lost a substantial fraction of their spiral mass due to interactions. Alternatively, van den Bergh (2009b) argues that stripping of a lower luminosity, late-type spiral should be easier than stripping of a higher luminosity, early-type spiral, which could also account for the luminosity difference. In an examination of the environment of S0 galaxies, van den Bergh (2009b) found no significant difference in the average luminosities, flattenings, or distribution of S0 subtypes in clusters, groups, or the field, indicating that some S0s develop as a result of internal effects, such as the influence of an active galactic nucleus.

Barway et al. (2011) noted that lower luminosity S0s have a higher bar fraction than higher luminosity S0s (83% versus 17%), suggesting that the two groups form in different ways (see also Barway et al. 2007). These authors suggest that faint S0s are stripped late-type spirals, which are known to have a high bar fraction (Barraza et al. 2008).

Environmental effects in clusters do not always have to involve drastic transformations in morphology. Sometimes the effects are more subtle. Figure 28 shows several spiral galaxies that are also members of the Virgo Cluster. These galaxies highlight processes that affect the star-forming disk while leaving the older stellar disk relatively unaffected. NGC 4580 and 4689 are galaxies having a patchy inner disk and a smooth outer disk, called “Virgo types” by van den Bergh et al. (1990). These objects suggest that the environment of such galaxies has somehow truncated the star-forming disk, with a greater concentration of truncated disks toward the cluster core. Similar results are obtained from observations of the HI gas disks of Virgo cluster galaxies (e.g., Giovanelli & Haynes 1985; Cayatte et al. 1994; Chung et al. 2009).

Koopmann & Kenney (2004) summarize the results of an extensive survey of H α emission from Virgo Cluster galaxies, and identify different categories of environmentally-

influenced star formation characteristics based on $H\alpha$ imaging. The blue light images of examples of each category are included in Figure 28, and show how the subtleties are manifested in regular morphology. Using a sample of isolated spiral galaxies to define “normal” star formation, Koopmann and Kenney defined several categories of Virgo spiral galaxy star-forming disks: Category “N” refers to disks whose star formation is within a factor of three of the normal levels. “E” cases have star formation enhanced by more than a factor of three compared to normal. “A” cases are “anemic” spirals (section 6.4) having star formation reduced by more than a factor of 3 compared to normal. “T/N” refers to galaxies where the star-forming disk is sharply cut off, but inside the cutoff, the star formation levels are normal (the [s] means truncation is severe). One of these, NGC 4580, is so unusual that Sandage & Bedke (1994) classify it as Sc(s)/Sa, where the Sc part is the inner disk and the Sa part is the outer disk. In “T/A galaxies”, the inner star-formation is at a low level, as in anemic cases, while in “T/C” galaxies, most of the star formation is confined within the inner 1 kpc. Koopmann and Kenney found that the majority of Virgo Cluster spiral galaxies have truncated star-forming disks.

The idea is that the interstellar medium (ISM) of a cluster galaxy can interact with the intra-cluster medium (ICM), stripping the ISM (via ram pressure; Gunn and Gott 1972) but leaving the stellar disk intact. Truncated gas and star-forming disks result because ram-pressure stripping is more severe in the outer parts of galaxies (e. g., Book and Benson 2010 and references therein). In Virgo, most galaxies with truncated star-forming disks have relatively undisturbed stellar disks and normal to slightly enhanced inner disk star formation rates, suggesting that ICM-ISM stripping is the main mechanism in the reduction of their star formation rates. The cases found to have relatively normal or enhanced star formation rates are preferentially located in the outer parts of the cluster and likely have never visited the core region. Only galaxies which go near the center get significantly stripped. However, tidal effects also contribute to morphological changes. Several galaxies,

including many of the T/C class, display peculiarities consistent with tidal effects, such as nonaxisymmetric circumnuclear star formation, shell features (e.g., NGC 4424 in Figure 28), and enhanced inner star formation rates.

A recent study by Yagi et al. (2010) provides dramatic and clear evidence of disk gas stripping in galaxies thought to be relatively new arrivals to the core region of the Coma Cluster. Using deep H α imaging, these authors detected ionized gas in clouds that are mostly outside the main disk of a dozen Coma galaxies. Three distinct morphologies of the distributions of these clouds were found: (1) connected clouds that blend with disk star formation; (2) long, connected lines of clouds that extend from a central gas knot but are not related to the disk light; and (3) clouds completely detached from the main disk. Examples of these categories are illustrated in Figure 29. Yagi et al. interpret them in terms of an evolutionary gas-stripping sequence where category (1) galaxies are in an earlier phase of stripping while the category (3) galaxies are in the most advanced phase. It is likely that large disk galaxies in Coma would be completely stripped eventually because of the cluster’s high ICM density and broad velocity distribution. The same process seen in Coma likely occurs in Virgo but is only partial for the large spirals owing to the lower ICM density and velocities in Virgo (Koopmann & Kenney 2004).

10.3. Interacting and Peculiar Galaxies

10.3.1. *Tidal Tails, Arms, and Bridges*

It is perhaps fitting that the first major spiral galaxy discovered was in the interacting pair M51 (section 2). Numerical simulations (Salo & Laurikainen 2000a,b) have shown that both parabolic and bound passages of the companion, NGC 5195, can explain the observed morphology and other characteristics of the system. It turns out that M51 defines a class

of interacting systems known as M51-type pairs. Figure 30 shows an example in the pair NGC 2535-6. In each case, the larger component has a strong two-armed spiral, with one arm appearing “drawn” to the smaller companion. An extensive catalogue of M51-type pairs is provided by Jokimaki et al. (2008).

Other distant encounters can produce tidal tails or bridges of material between galaxies (top row, Figure 30). NGC 4676, also known as the “Mice,” is a pair of strongly interacting galaxies where a very extended tidal tail has formed in one component. The strongly-interacting pair NGC 5216/18 has developed a bright connecting bridge of material, and each component shows tidal tails. The evolution of this system, and the role of encounters on bar formation, is described by Cullen et al. (2007).

10.3.2. *Dust-Lane Ellipticals*

Figure 30 also shows several examples of morphologies that may result from minor mergers of a small galaxy with a more massive, pre-existing elliptical galaxy. Bertola (1987) brought attention to the unusual class of *dust-lane ellipticals*, where an otherwise normal elliptical galaxy shows peculiar lanes of obscuring dust. It was de Vaucouleurs’s personal view that “if an elliptical shows dust, then it’s not an elliptical!” However, Bertola showed that an unusual case like the radio elliptical galaxy NGC 5128, where a strong dust lane lies along the *minor axis* of the outer light distribution, is simply the nearest example of a distinct class of objects. Further study showed that dust-lane ellipticals come in several varieties. The minor axis dust lane type appears most common, but cases of alignment along the major axis of the outer isophotes (major axis dust lanes) as well as cases of misalignment are also known (see the upper left panels of Figure 30). The origin of these very regular dust lanes is thought to be a merger of a gas-rich companion (e.g., Oosterloo et al. 2002). The regularity of the dust lanes suggests that the mergers are in advanced states.

10.3.3. *Shell/Ripple Galaxies*

The two lower left frames of Figure 30 show examples of galaxies having “shells,” or faint, arc-shaped brightness enhancements of varying morphology. They were first discovered on deep photographs by Malin (Malin & Carter 1980), and appeared to be associated mainly with elliptical galaxies. In fact, the first examples, NGC 1344 and 3923, are classified in catalogues as ordinary ellipticals because the shells are not detectable on photographs of average depth. Once the class was recognized, a detailed search led to other examples which were listed by Malin & Carter (1980, 1983). The term “shells” implies a particular three-dimensional geometry that Schweizer & Seitzer (1988) argued imposes a prejudice on the interpretation of the structures. They proposed instead the alternate term “ripples,” which implies less of a restrictive geometry.

The explanation of shell/ripple galaxies is one of the great success stories in galactic dynamics (see review by Athanassoula & Bosma 1985). Shells are thought to be remnants of a minor merger between a massive elliptical and a lower mass disk-like galaxy. The main requirements are that the disk-shaped galaxy be “cold”, or lack any random motions, and that the potential of the elliptical galaxy should be rigid, meaning the elliptical is much more massive than its companion. The smaller galaxy’s stars fall into the center of the galaxy and phase wrap, or form alternating outward-moving density waves made of the disk galaxy’s particles near the maximum excursions of their largely radial orbits in the rigid potential. Many, but not all, of the main properties of shell Es can be explained by this model. Other issues concerning shell galaxies are reviewed by Kormendy and Djorgovski (1989).

Taylor-Mager et al. (2007; see their Figure 2) have proposed a simple classification of interacting systems that highlights different interaction classes. A pre-merger (type pM) includes two interacting galaxies that are sufficiently far apart to suffer little apparent

distortion. A minor merger (mM) is two galaxies showing evidence of merging, but one component is much smaller than the other. A major merger (M) has two comparable brightness galaxies in the process of merging, while a merger remnant (MR) is a state sufficiently advanced that the merging components are no longer distinct.

10.3.4. *Ultra-Luminous Infrared Galaxies*

Related to interacting systems are the infrared-bright galaxies first identified by Rieke & Low (1972) based on $10\mu\text{m}$ photometry. From studies based on the Infrared Astronomical Satellite (IRAS), Sanders & Mirabel (1996) classified a galaxy as a “luminous infrared galaxy” (LIRG) if its luminosity in the $8\text{--}1000\mu\text{m}$ range is between 10^{11} and $10^{12} L_{\odot}$. If the luminosity in the same wavelength range exceeds $10^{12} L_{\odot}$, then the object is called an “ultra-luminous infrared galaxy” (ULIRG). Detailed studies have shown that at high redshifts, LIRGS and ULIRGS are a dominant population of objects (see discussion in Pereira-Santaella et al. 2010).

The morphologies of nine ULIRGS were studied using HST *B* and *I*-band images by Surace et al. (1998). Their montage of six of these objects is shown in Figure 31. In every case there are clear signs of interactions, and all are likely linked to mergers or mergers in progress. Several, like Mk 231, have bright Seyfert nuclei. Arribas et al. (2004) obtained extensive imaging of local LIRGS, and found a similar high proportion of strongly interacting and merging systems.

The merger rate is considered one of the most important parameters for understanding galaxy evolution. It has been difficult to estimate, and issues connected with it are discussed by Jogee et al. (2009; see also Conselice 2009). A merger is considered major if it involves a companion ranging from $1/4$ to approximately equal mass to the main galaxy. A major

merger of two spiral galaxies can destroy both disks and lead to an $r^{\frac{1}{4}}$ law profile remnant through violent relaxation. Minor mergers involve companions having 1/10 to 1/4 the mass of the main galaxy. Both types of mergers, while in progress, can lead to many specific morphological features such as highly distorted shapes, tidal tails and bridges, shells and ripples, and warps. Even some bars and spiral patterns are thought to be connected to interactions, and especially galaxies with a double nucleus are thought to be mergers. As discussed in section 10.1, mergers or collisions may also be at the heart of rare morphologies such as ring and polar ring galaxies. Using visual classifications of merger types, Jogee et al. (2009) estimate that 16% of high mass galaxies have experienced a major merger, while 45% have experienced a minor merger, during the past 3-7Gyr ($z=0.24-0.80$).

10.4. Warps

A warp is an apparent bend or slight twist in the shape of the disk of a spiral galaxy (see Sellwood 2010 and references therein). In a warp, stars and gas clouds move in roughly circular orbits, but the orientation of these orbits relative to the inner disk plane changes with increasing radius. Warps are most easily detected in edge-on galaxies because the bending of the outer orbits makes the galaxy look like an integral sign. Although often most pronounced in an HI map, warps can be seen in ordinary optical images of edge-on galaxies. Figure 32 shows three galaxies having strong optical warping of the disk plane. In two of the galaxies, the bright inner disk is unwarped, while a fainter and thicker outer disk zone is twisted relative to the inner disk. In UGC 3697, the warping is exceptionally visible. In general, optical warping is less severe than HI warping.

Warping is a very common aspect of spiral galaxies (e.g., Binney 1992) and has been interpreted in terms of perturbations (gaseous infall or interactions) that trigger bending instabilities (e.g., Revaz & Pfenniger 2007). Garcia-Ruiz, Sancisi, & Kuijken (2002)

estimated HI warp angles, the angle between the inner disk plane and the assumed linear warping zone, to range from nearly 0° to more than 30° . A useful summary of previous warp studies is provided by Saha et al. (2009), who examine warp onset radii in mid-IR images. The theory of warps is reviewed by Sellwood (2010).

10.5. The Morphology of Active Galaxies

The morphology of active galaxies (also called “excited” galaxies by van den Bergh 1998) is important to consider because of a possible link between morphological features and the fueling of the active nucleus. Early studies showed a preponderance of ring, pseudoring, and bar features in Seyfert galaxies that suggested the link was bar-driven gas flow (Simkin, Su, & Schwarz 1980). Several examples of the morphology of Seyfert and other active galaxies are shown in Figure 33. The activity classifications are based mainly on spectroscopy, not on morphology, and are described by Veron-Cetty & Veron (2006).

A detailed study of active galaxy morphologies by Hunt & Malkan (1999) provided similar results to the early studies. These authors examined the morphologies of a large sample of galaxies selected on the basis of their $12\mu\text{m}$ emission, and found that outer rings and inner/outer ring combinations are 3-4 times higher in Seyfert galaxies than in normal spirals. In contrast, bars were found to occur with the same frequency ($\approx 69\%$) in Seyferts as in normal spirals, while for HII/starburst galaxies, the frequency was much higher ($>80\%$). Although outer rings are found mostly in barred galaxies, bars do not promote the nuclear activity of Seyfert galaxies. Hunt & Malkan (1999) interpret this inconsistency in terms of timescales: it takes roughly 3×10^9 yr for a closed outer ring to form, a timescale during which a bar may weaken or dissolve. Because of this, a high ring frequency in Seyferts would indicate an advanced evolutionary state. Related to the same issue, Comerón et al. (2010) found that nuclear rings do not correlate with the presence of nuclear activity.

The study of Hunt & Malkan (1999) used mostly RC3 classifications to deduce the bar fraction in active galaxies. These visual classifications are based on blue light images and hence dust could effectively obscure some bars. Knapen et al. (2000) used high resolution near-IR images of well-defined samples and quantitative bar detection methods to deduce that bars are more frequent in Seyfert galaxies than in a control sample of non-active galaxies: $79\% \pm 7.5\%$ versus $59\% \pm 9\%$ (see also Laine et al. 2002). Laurikainen, Salo, & Buta (2004) came to a similar conclusion for 180 galaxies in the OSUBSGS, based on near-IR H -band images. The former studies used ellipse fits to identify bars, while Laurikainen et al. used Fourier analysis.

McKernan, Ford, & Reynolds (2010) also consider outer rings and pseudorings as probes of models of AGN fueling from interactions and mergers. The idea is that a closed outer ring takes a long time to form and is very fragile, being sensitive to interactions and changes in the bar pattern speed (e.g., Bagley et al. 2009). An interaction can change a closed outer ring into a pseudoring and could possibly destroy the ring. Thus, rings are probes of the interaction history of active galaxies. McKernan et al. found no difference between the AGN found in ringed galaxies and those found in galaxies without rings. But in those with rings, recent interactions can be ruled out and activity may be tied to short-term internal secular evolutionary processes.

Bahcall et al. (1997) presented HST images of 20 luminous, low redshift quasars observed with a wide V -band filter. Figure 34 is reproduced from their paper and shows images of the host galaxies after removal of most of the quasar light. The images show a variety of morphologies, including ellipticals, interacting pairs, systems with obvious tidal disturbances, and normal-looking spirals. An example of the latter is PG1402+261 ($z=0.164$), which is type $(R'_1)SB(rs)a$ based partly also on the image shown in Figure 7 of Bahcall et al. Based on the number of hosts showing signs of interactions, as well as the

number of companions, Bahcall et al. conclude that interactions may trigger the quasar phenomenon.

10.6. The Morphology of Brightest Cluster Members

Matthews, Morgan, & Schmidt (1964) observed the optical morphologies of the radio sources identified with the brightest members of rich galaxy clusters. They found that the most common form was what Morgan (1958) called a “D” galaxy, meaning a galaxy having an elliptical-like inner region surrounded by an extensive envelope (see discussion in van den Bergh 1998). Although these superficially resembled Hubble’s S0s, none were found having a highly-elongated shape, implying that the galaxies are not as highly flattened as typical S0s. Another characteristic of the cluster D galaxies was their very large linear size and exceptional luminosity, much larger than a typical cluster member. To denote these extreme objects in the Morgan system, the prefix c was added as in the old classification of supergiant stars. Even today, Morgan’s notation “cD” is used to describe these supergiant galaxies which are generally considered outside the scope of the Hubble system.

The most detailed study of the photometric properties of brightest cluster members (BCMs) was made by Schombert (1986, 1987, 1988; see also various references therein). The main BCM types Schombert considered were gE (giant ellipticals), D, and cD, distinguished mainly from the appearance of profile shape. D galaxies are larger and more diffuse with shallower profiles than gE galaxies, while a cD galaxy is the same as a D galaxy but with a large extended envelope (Schombert 1987). cD envelopes can extend to 500 kpc or more. Kormendy & Djorgovski (1989) argue that only cD galaxies are sufficiently physically distinct from ellipticals to merit being a separate class, and recommended that the “D” class not be used.

Two cD galaxies and two gE galaxies are shown in Figure 35. To give an idea of the scale of these objects, the vertical dimension of the frames corresponds to 201, 232, and 132 kpc for (left to right) UGC 10143 (A2152), NGC 4874/89 (A1656), and NGC 6041 (A2151), respectively. The cD classification of NGC 4874 is due to Schombert (1988), and one can see in Figure 35 that it is much larger and has a shallower brightness profile than nearby NGC 4889. The cD envelope is detected as an excess of light in the outer regions relative to a generalized brightness profile, and may not even be the light that leads to the visual classification of cD.

Based on structural deviations such as the large radii, shallow profile slopes, and bright inner regions, Schombert (1987) concluded that BCMs fit well with the predictions of merger simulations, including accretion and “cannibalism” of smaller cluster members. Properties of cD envelopes (as separated photometrically from the parent galaxy) may suggest a stripping process for their formation (Schombert 1988).

As noted in section 5.1, many BCMs in RC3 received the classification E^+ , suggesting that the characteristic brightness profiles give a hint of an envelope interpreted as an incipient disk. The distribution of axial ratios of cDs actually is flatter on average than normal ellipticals (Schombert 1986), but it is not clear that the perceived envelopes in BCM E^+ galaxies are actually as flattened as a typical disk. A local example of a gE galaxy is M87, classified as type E^+0-1 by de Vaucouleurs.

11. Star Formation Morphologies

11.1. $H\alpha$ Imaging

The standard waveband for galaxy classification, the B -band, is sensitive enough to the extreme population I component that the degree of resolution of spiral arms into

star-forming complexes is part of the classification. The B -band, however, also includes a substantial contribution from the older stellar background. One way to isolate only the star-forming regions in a galaxy is imaging in $H\alpha$, which traces HII regions. Apart from showing the distribution of star formation (modified by extinction), $H\alpha$ imaging also traces the rate of global photoionization, which in turn directly traces the rate of formation of stars more massive than about $10M_{\odot}$ (Kennicutt, Tamblyn, & Congdon 1994). The initial mass function (IMF), either assumed or constrained in some way (using, for example, broadband colors), allows $H\alpha$ fluxes to be converted to the total star formation rate over all stellar masses.

$H\alpha$ imaging often shows well-organized patterns of HII regions that follow structures like spiral arms and especially rings. Images of six early-to-intermediate-type ringed galaxies are shown in Figure 36 (Crocker, Baugus, & Buta 1996). The way $H\alpha$ imaging usually works is a galaxy is imaged in or near its redshifted $H\alpha$ wavelength, and then in a nearby red continuum wavelength. The net $H\alpha$ image is the difference between the $H\alpha$ image and the scaled red continuum image. Often, the $H\alpha$ filter used is broad enough to include emission from [NII] 6548 and 6584. For each of the galaxies shown in Figure 36, the left image is the red continuum image, while the right image is the net $H\alpha$ image. Of the four barred spirals shown (NGC 1433, 7329, 6782, and 7267), three show no HII regions associated with the bar. These three (NGC 1433, 7329, and 6782) all have conspicuous inner rings which are lined with HII regions. As shown by Crocker, Baugus, & Buta (1996), the distribution of HII regions around inner rings is sensitive to the intrinsic shape of the ring. When the ring is highly elongated, the HII regions concentrate around the ends of the major axis (which coincide with the bar axis; NGC 6782), while when the ring is circular, the HII regions are more uniformly spread around the ring (NGC 7329). Inner ring shapes do not correlate well with maximum relative bar torques in a galaxy (dVA), but Grouchy et al. (2010) have shown that when local forcing is considered instead, ring shapes and bar

strengths are well-correlated.

The case of NGC 7267 is different in that most of its $H\alpha$ emission is concentrated in the bar. Martin & Friedli (1997) have argued that star formation along galactic bars could provide clues to gas flow in the inner regions of galaxies and the fueling of starbursts and AGN. These authors present models which suggest an evolution from a pure $H\alpha$ bar, to an $H\alpha$ bar with ionized gas in the center, to a gas-poor bar with strong nuclear or circumnuclear star formation. This suggests that the bar of NGC 7267 is younger than those in NGC 1433, 7329, and 6782.

The two other galaxies shown in Figure 36 are nonbarred or only weakly-barred. NGC 6935 is an interesting case where a nonbarred galaxy has a strong ring of star formation. Grouchy et al. (2010) found that the star formation properties of inner rings, but not the distribution of HII regions, are independent of the ring shapes and bar strengths in a small sample. The case of NGC 7702 is different from the others. This is a late S0 (type S0⁺) showing a very strong and largely stellar inner ring. The ring shows little ionized gas and appears to be in a quiescent phase of evolution.

11.2. Ultraviolet Imaging

The best global imaging of nearby galaxies at ultraviolet wavelengths has been obtained with the *Galaxy Evolution Explorer* (GALEX, Martin et al. 2005), which provided detailed images of galaxies of all types at wavelengths of 0.225 and 0.152 μ m. These images reveal young stars generally less than ≈ 100 Myr old but are affected by dust extinction. There is a strong correlation between the UV morphology and the $H\alpha$ morphology (Figure 37). Like $H\alpha$, UV fluxes from galaxies can be used to estimate star formation rates once extinction is estimated, and are particularly sensitive to the ratio of the present to the average past

star formation rate. UV imaging is an effective way of decoupling the recent star formation history of a galaxy from its overall, long-term star formation history.

Figure 38 shows near-UV ($0.225\mu\text{m}$) images of eight galaxies over a range of Hubble types. The two earliest types, NGC 1317 and 4314 (both Sa) show a near-UV morphology dominated by a bright circumnuclear ring of star formation. The SB(r)b galaxy NGC 3351 shows a conspicuous inner ring of star formation and little emission from its bar region. In contrast, the SBc galaxy NGC 7479 shows strong near-UV emission from its bar. The late-type galaxies NGC 628 [type SA(s)c] and NGC 5474 [type SA(s)m] are typical of their types, but most interesting is NGC 4625. A key finding of GALEX was extended UV emission well beyond the optical extent of some galaxies. NGC 4625 is an example where the main optical part [type SABm] is only a small fraction of the extent of the UV disk (Gil de Paz et al. 2005).

The final object shown in Figure 38 is NGC 5253, a basic example of what de Vaucouleurs classified as I0 (section 5.3). The inner region is a bright boxy zone of star formation, and even the extended disk is prominent.

11.3. Atomic and Molecular Gas Morphology

Related to star formation morphologies are the distributions of atomic and molecular gas. Far from being randomly-distributed clouds of interstellar material, atomic and molecular gas morphologies can be highly organized, well-defined patterns. Recent high quality surveys have provided some of the best maps of these distributions in normal galaxies. Atomic hydrogen is mapped with the 21cm fine structure emission line, which has the advantage of not being affected by extinction and for being sufficiently optically thin in general to allow total HI masses to be derived directly from HI surface brightness maps.

In addition, HI maps provide information on the kinematics and dynamics of the ISM, as well on the existence and distribution of dark matter in galaxies. Molecular hydrogen is generally mapped using the ^{12}CO J=1-0 rotational transition at a wavelength of 2.6mm, under the assumption that CO and hydrogen mix in a roughly fixed proportion.

Although numerous maps have been made of the HI distribution in nearby galaxies, the most sophisticated and detailed survey made to date is the “The HI Nearby Galaxies Survey” (THINGS, Walter et al. 2008). The earliest surveys had shown that HI is a tracer of spiral structure in galaxies, and the THINGS provides some of the highest quality maps revealing this correlation as well as other characteristics. From a morphological point of view, HI maps tend to reveal: (1) enhanced surface brightness in star-forming features such as spiral arms, rings, and pseudorings; (2) extended gaseous disks, such that the HI extent can exceed the optical extent by several times; and (3) supernova-driven and star-formation driven, wind-blown holes.

Figure 39 shows the HI morphologies of eight THINGS galaxies ranging from the Sab galaxy NGC 4736 to the Sm galaxy DDO 50 (Holmberg II). Bright Sc galaxies like NGC 628 (M74) and NGC 5236 (M83) show HI distributions that extend well beyond the optical disks. These extended patterns can include large spirals as in NGC 628. In M81 and M83, the HI traces the optical spiral structure well. Large rings or pseudorings are seen in NGC 2841 and NGC 4258, while M81 shows an intermediate-scale ring of gas that is much less evident optically. The bright star-forming inner ring in NGC 4736 is well-defined and easily distinguished in HI, but the galaxy’s diffuse stellar outer ring is more of an asymmetric spiral zone.

Most interesting in HI maps are the obvious holes where there appears to be a deficiency of neutral gas compared to surrounding regions. Especially large holes are seen in the HI morphology of the late-type dwarf DDO 50. These holes are thought to be regions

cleared by the stellar winds and explosions of massive stars contained or once contained within them. The holes are 100pc to 2kpc in size, and have different systematic properties in early and late-type galaxies in the sense that holes may last longer in late-type dwarfs owing to the lack of serious shear due to strong differential rotation (Balogh et al. 2009). Holes may also be found outside the standard isophotal optical angular diameter.

The dwarf galaxy DDO 154 shown in Figure 39 has one of the largest ratios of HI to optical diameter, a factor of 6 at least according to Carignan & Purton (1998), who also estimated that 90% of the mass of the galaxy is in the form of dark matter. The HI and optical morphologies bear little resemblance to one another. Another example of strongly uncorrelated HI and optical morphologies is NGC 2915, a very gas-rich galaxy whose optical morphology is a blue compact dwarf while its at least 5 times larger HI morphology includes a prominent outer spiral with no optical counterpart (Meurer et al. 1996), leading to the concept of a purely “dark spiral.” Bertin & Amorisco (2010) consider a general interpretation of such large outer HI spirals, especially those seen in galaxies like NGC 628 and NGC 6946: the spirals represent short trailing waves that carry angular momentum outwards from corotation and, at least in the gaseous component, penetrate a normal barrier at the OLR of the stellar disk pattern and go far out into the HI disk. The short trailing waves are thought to excite the global spiral arms seen in the main optical body of the galaxy (where the prominent optical spirals of NGC 628 and NGC 6946 are found). How NGC 2915 fits into this picture is unclear since the main stellar body of this galaxy is not a grand-design spiral.

Galaxies whose HI disks do not extend much beyond the optical light distribution are also of interest. NGC 4736 in Figure 39 is an example. The large, nearby ringed barred spiral NGC 1433 was found by Ryder et al. (1996) to have neutral hydrogen gas concentrated in its central area, its inner ring, and in its outer pseudoring, with no gas

outside the visible disk light and a lower amount of gas in the bar region compared to the ring regions. Higdon et al. (1998) showed that in the ringed, barred spiral NGC 5850, neutral gas is concentrated in the inner ring and in the asymmetric outer arm pattern, with little or no emission detected outside this pattern. The asymmetry led Higdon et al. to propose that NGC 5850 has possibly experienced a high speed collision with nearby NGC 5846.

In galaxy clusters, it is well-known that environmental effects can truncate an HI disk so that it is *smaller* than the optical disk light. This is dramatically illustrated in the high resolution VLA HI maps of Virgo Cluster galaxies by Chung et al. (2009), who found that galaxies within 0.5 Mpc of the cluster core have severely truncated HI disks typically less than half the size of the optical standard isohotal diameter, D_{25} . A variety of earlier studies had already shown these galaxies to be HI-deficient compared to field galaxies of similar types. As noted in section 10.2, an interaction between a cluster galaxy’s ISM and the intra-cluster medium can account for these unusual modifications of HI morphology. Chung et al. also provide evidence for this interaction in some morphologies that appear to be gas stripping in progress.

The Berkeley-Illinois-Maryland Survey of Nearby Galaxies (BIMA SONG; Regan et al. 2001; Helfer et al. 2003) provided some of the highest quality CO maps of normal galaxies. CO emission is often seen in intermediate (Sab-Sd) galaxies, which have a high enough gas content and metallicity to allow the ^{12}CO J=1-0 2.6mm emission line to be detectable. The CO distributions of eight such galaxies from this survey are shown in Figure 40. These display some of the range of molecular gas morphologies seen. CO traces the inner spiral arms of NGC 628, 1068, and 4535, and is seen along the bar of NGC 2903. A common CO morphology is a large-diameter ring of giant molecular clouds (GMCs), without a central CO concentration, as seen in NGC 2841 and 7331. The rings are the

peaks of exponentially-declining distributions. The coherent inner molecular gas ring in NGC 7331 appears more like a typical resonance ring, and has an estimated molecular gas mass of $3.4 \times 10^9 M_{\odot}$ (Regan et al. 2004). The CO distribution in NGC 2403 appears to be concentrated in individual GMCs, with little diffuse emission, while that in NGC 3351 is characterized by a small central bar aligned nearly perpendicular to the galaxy’s primary bar. Helfer et al. (2003) show that the Milky Way, M31, and M33 have CO morphologies that are consistent with the range of morphologies found by BIMA SONG.

12. Infrared Observations: Galactic Stellar Mass Morphology

Infrared observations have considerable advantages over optical observations of galaxies. While traditional *B*-band images are sensitive to dust and extinction (both internal and external), the effects of extinction in the near- and mid-IR are much less, and become virtually negligible at $3.6\mu\text{m}$. Spiral galaxies imaged at wavelengths successively longer than *B*-band become progressively smoother-looking, not only due to the reduced effect of extinction, but also to the de-emphasis of the young blue stellar component. The combination of these effects has led to the popular idea that IR imaging reveals the “stellar backbone” of galaxies, i. e., the distribution of actual stellar mass (e. g., Rix & Rieke 1993; Block et al. 1994). Thus, infrared imaging has become a staple for studies of the gravitational potential and stellar mass distribution in galaxies (e. g., Quillen, Frogel, & González 1994), and for the quantification of bar strength from maximum relative gravitational torques (e.g., Buta & Block 2001; Laurikainen & Salo 2002).

Infrared imaging has also revealed interesting outer structures such as the large outer red arcs seen in M33, which have been interpreted by Block et al. (2004b) to be swaths of extremely luminous carbon stars formed from external accretion of low metallicity gas. Power spectrum analysis of the IR structures in classical spirals has been used to detect

azimuthal “star streams” and to evaluate the role of turbulence on star formation and spiral structure (Block et al. 2009 and references therein).

Near-infrared imaging from $0.8\text{--}2.2\mu\text{m}$ can be successfully obtained from groundbased observatories but with the serious drawback that the brightness of the sky background increases substantially over this range. As a result, it has not been possible to achieve a depth of exposure at, for example, $2.2\mu\text{m}$ comparable to the kinds of depths achievable at optical wavelengths without excessive amounts of observing time. The first major near-IR survey designed for large-scale morphological studies was the Ohio State University Bright Spiral Galaxy Survey (OSUBSGS, Eskridge et al. 2002), which included optical *BVRI* and near-IR *JHK* images of 205 bright galaxies of types S0/a to Sm in a statistically well-defined sample selected to have total blue magnitude $B_T \leq 12.0$ and isophotal diameter $D_{25} \leq 6''.5$. This survey allowed a direct demonstration of how galaxy morphology actually changes from optical to near-IR wavelengths, not merely for a small, selected sample of galaxies, but for a large sample covering all spiral subtypes. The main near-IR filter used in this survey was the *H*-band at $1.65\mu\text{m}$.

The OSUBSGS was later complemented by the *Near-Infrared S0 Survey* (NIRS0S, Laurikainen et al. 2005, 2006, 2007, 2009, 2010; Buta et al. 2006), a K_s -band imaging survey of 174 early-type galaxies in the type range S0[−] to Sa, but mostly including S0s, some of which were misclassified as ellipticals in RC3. NIRS0S images are deeper than OSUBSGS near-IR images owing to the use of larger telescopes and longer on-source times. Although S0 galaxies are dominated by old stars and are usually smooth even in blue light images, the K_s band was chosen to complement the OSUBSGS sample of spirals in order to make a fair comparison between bar strengths and bulge properties of S0s and spirals. Also, S0 galaxies are not necessarily dust-free, and near-IR imaging is still necessary to penetrate what dust they have. NIRS0S has led to several important findings about S0

galaxies: (1) a class of S0s, not previously recognized, having prominent lenses but very small bulges that are more typical of Sc galaxies than of earlier type spirals (example: NGC 1411, Laurikainen et al. 2006); (2) considerable evidence that S0 galaxies have pseudobulges just as in many spirals (Laurikainen et al. 2007). While the bulges of the latter are likely to be made of rearranged disk material in many cases (section 9), those in S0s are likely to be related to the evolution of bars. S0 bulges tend to be nearly exponential (Sersic index $n \leq 2$), are supported against gravity by rotation rather than random motions, and often include clear inner disks; (3) good correlations between bulge effective radii, r_e , and disk radial scalelength, h_R , as well as between the K_s -band absolute magnitudes of the bulge and disk, suggest that S0 bulges are not formed from hierarchical mergers, implying that S0s could be stripped spirals, although the lower bar fraction in S0s suggest that this is in conjunction with evolution due to bars and ovals; (4) 70% of S0-S0/a galaxies have ovals or lenses, suggesting that bars have been weakened in such galaxies over time; and (5) not only bulges, but also disks of S0s are similar to those in S0/a-Scd spirals.

The *Two-Micron All-Sky Survey* (2MASS, Skrutskie et al. 2006) provided near-IR JHK_s images of a much larger galaxy sample than either the OSUBSGS or NIRS0S, although these images lack the depth of the OSUBSGS and NIRS0S images in general. 2MASS provided considerable information on near-infrared galaxy morphology, which led to the extensive *2MASS Large Galaxy Atlas* (Jarrett et al. 2003).

The best imaging of galaxies at mid-IR wavelengths has been obtained with the *Spitzer Space Telescope* using the Infrared Array Camera (IRAC, Fazio et al. 2004) and 3.6, 4.5, 5.8, and 8.0 μ m filters. The 3.6 and 4.5 μ m filters provide the most extinction-free views of the stellar mass distribution in galaxies, while the 5.8 and 8.0 μ m filters reveal the interstellar medium (ISM) (Pahre et al. 2004). The loss of coolant in 2008 prevented further observations with the 5.8 and 8.0 μ m filters, but the 3.6 and 4.5 μ m filters could still

be used. This led to the *Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies* (S⁴G, Sheth et al. 2010), a 3.6 and 4.5 μ m survey of 2,331 galaxies of all types closer than 40Mpc. These wavelengths sample the Rayleigh-Jeans decline of the stellar spectral energy distribution of all stars hotter than 2000K. S⁴G images shown here are from Buta et al. (2010a) and are based on pre-survey archival images processed in the same manner as survey images. *Spitzer* observations have a very low background compared to groundbased near-IR observations, and thus IRAC images are the deepest galaxy images ever obtained in the IR.

Figure 41 compares images of M51 at four wavelengths: the GALEX 0.15 μ m band, the *B*-band (0.44 μ m), the near-infrared *K_s* band (2.2 μ m), and the IRAC 3.6 μ m band. Only the *B* and *K_s*-band images are from groundbased observations. The GALEX image reveals the extensive star formation in the spiral arms, and the complete absence of star formation in the companion NGC 5195 as well as in the complex tidal material north of the companion. The star formation in the arms is more subdued in the *B*-band, and almost completely subdued in the *K_s*-band. The arms are so smooth in the *K_s* band that the galaxy resembles an Sa or Sab system. (The *B*-band type is Sbc.) Surprisingly, this is not the case in the 3.6 μ m image whose considerably greater depth compared to the *K_s*-band image is evident. The spiral arms in the 3.6 μ m band are lined by numerous resolved objects, many of which are correlated with the star-forming regions seen in the *B*-band. This is dramatically seen also in the SB(s)cd galaxy NGC 1559 (Figure 42), where an IRAC 3.6 μ m image is compared with a *B*-band image. These show that resolved features in the deep 3.6 μ m image are well-correlated with *B*-band star-forming complexes. Thus, mid-IR 3.6 μ m images are *not* completely free of the effects of the extreme population I stellar component (see discussions in Block et al. 2009 and Buta et al. 2010a).

A sampling of S⁴G images as compared to *B*-band images for the same galaxies from the dVA is shown in Figure 43. The four galaxies shown, NGC 584, 1097, 628, and 428,

have dVA types of S0[−], SBb, Sc, and Sm, respectively, thus covering almost the entire Hubble-de Vaucouleurs sequence. Although the very dusty interacting system NGC 1097 looks slightly “earlier” at 3.6 μ m, these images show again that on the whole the morphology in the two wavebands is very similar. The same is seen for other galaxies described by Buta et al. (2010a), who found that 3.6 μ m types, judged using the same precepts described in the dVA for blue light images, are well-correlated with blue-light types. On average mid-IR classifications for RC3 S0/a-Sc galaxies are about 1 stage interval earlier than *B*-band classifications, with little difference for types outside this range. The correlation is much better than what was expected from previous near-IR studies (Eskridge et al. 2002). 3.6 μ m galaxy morphology is sufficiently contaminated by recent star formation to allow the same criteria defined for blue light images to be used for galaxy classification, a surprising result.

Drastic differences between 3.6 μ m and *B*-band morphology are seen only for the most dusty galaxies. One example is NGC 5195, shown also in Figure 41. This galaxy, classified as Irr II in the Hubble Atlas and as I0 by de Vaucouleurs, appears as a regular early-type galaxy of type SAB(r)0/a (see also Block et al. 1994). Other galaxies that can look very different are flocculent spirals such as NGC 5055 (Figure 44). The flocculence largely disappears at 3.6 μ m, and a more global pattern is seen (see also Thornley 1996). The type of NGC 5055, Sbc, remains largely unchanged from *B* to 3.6 μ m.

As noted by Helou et al. (2004), the mid-IR wavelength domain marks the transition from emission dominated by starlight to emission dominated by interstellar dust. While images at 3.6 μ m show the stellar bulge and disk almost completely free of dust extinction, an image at 8 μ m shows very little starlight but considerable emission from the ISM in the form of glowing dust.

Figure 45 shows an 8 μ m image of the nearby spiral galaxy M81 as compared to a *B* – *I* color index map coded such that blue star-forming features are dark while red dust lanes

are light. The $8\mu\text{m}$ image of M81 shows that its ISM is closely associated with its spiral arms. Comparison with the $B - I$ color index shows that both the star-forming arms as well as near-side dust lanes can be seen at $8\mu\text{m}$. Even the far-side lanes in the bulge region are clear at $8\mu\text{m}$, where no tilt asymmetry is manifested. Willner et al. (2004) argue that the dust emission from M81’s ISM is likely dominated by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs; Gillett et al. 1973) which have a prominent emission feature at $7.7\mu\text{m}$. Willner et al. also showed good correspondence between the nonstellar dust emission in M81 and the distribution of near-ultraviolet (NUV) emission. Some regions with bright dust emission and little NUV emission were attributed to excessive UV extinction, while areas with bright NUV and little dust emission were attributed to the effects of supernovae.

The $B - I$ color index map of M81 shows an additional set of dust lanes that have no counterpart in the $8\mu\text{m}$ map. These lanes are oriented roughly perpendicularly to the major axis about halfway between the center and the northern arm. Sandage & Bedke (1994) interpret these as foreground dust associated with high galactic latitude nebulosities in the halo of our Galaxy.

13. Intermediate and High Redshift Galaxy Morphology

The key to detecting observable evidence for galaxy evolution, that is, to actually see morphological differences that are likely attributable to evolution, is to observe galaxies at high redshift with sufficient resolution to reveal significant details of morphology. Butcher & Oemler (1978) had already found strong evidence for morphological evolution in the excess number of blue galaxies in very distant ($z=0.4-0.5$) rich galaxy clusters. These authors suggested that the blue galaxies are spiral galaxies, and that by the present epoch, these are the galaxies that become the S0s that dominate nearby rich, relaxed clusters (like the Coma Cluster, Abell 1656). An excellent summary of the issues connected with high

redshift morphological studies is provided by van den Bergh (1998).

Progress on galaxy morphology at high redshift could only be achieved with the resolution and depth of the Hubble Space Telescope. The Hubble Deep Field North (HDF-N, Williams et al. 1996), South (HDFS, Volonteri et al. 2000), and Ultra-Deep Field (HUDF, Beckwith et al. 2006), and the GOODS (Great Observatories Origins Deep Survey; Giavalisco et al. 2004), GEMS (Galaxy Evolution from Morphology and SEDS; Rix et al. 2004), COSMOS (Cosmic Evolution Survey; Scoville et al. 2007), and other surveys (e.g., Cowie et al. 1995), have provided a large body of information to work with. For example, studies of galaxies in the redshift range $0.3 \leq z \leq 0.9$ show that the proportion of irregular-shaped galaxies dramatically increases (e.g., Abraham et al. 1996). This means that the Hubble sequence as we know it did not always exist but was built up over time via mergers or secular evolution or both. Observations of submillimeter sources (Chapman et al. 2003) suggest some of these irregulars are extended major mergers.

Interpretation of evolution in the various deep surveys depends on knowledge of redshifts, which can be difficult to measure spectroscopically. A very useful technique for isolating galaxies in high redshift ranges is the UV-drop out method (Steidel & Hamilton 1992). Galaxies are compared in different filters, such as B_{435} , V_{606} , i_{775} , and z_{850} . If the redshift is high enough to move the Lyman limit at $0.0912\mu\text{m}$ out of any of the first three filters, there will be a significant drop in flux owing to absorption by hydrogen, and the galaxy is said to “drop out.” Galaxies found in this way are called “Lyman break” galaxies because the effect is partly caused by the spectral characteristics of hot stars, which show such a break. (Another cause is UV self-absorption.)

Steidel et al. (1996) used the UV drop-out approach to identify high z galaxies in the HDF-N, and also used direct spectroscopy to confirm that the method works. Beckwith et al. (2006) utilized the method to identify galaxies in the HUDF having z from 3.5 to 7. If

a galaxy is seen to drop out of a U -band filter such as F300W and seen in a B -band filter such as F450W (both used for the HDF-N; Williams et al. 1996), then the redshift range selected is $z=2.4$ to 3.4 . van den Bergh (1998) argues that most Lyman break galaxies are young ellipticals or bulges.

Van den Bergh et al. (2000) describe the issues connected with morphological classifications of galaxies to redshifts of $z \approx 1$. Resolution, band-shifting, and selection effects due to the magnitude-limited nature of surveys all enter into the interpretation of intermediate to high redshift galaxy morphology. Resolution is important because, typically, a nearby galaxy will have 100 times or more pixels in the image than a high z galaxy will have for classification. This is fewer pixels than sky survey images of nearby galaxies would have. The bandpass effect is important because the B -band, the standard wavelength for historical galaxy classification, is not sampling the same part of the spectrum as it would for nearby galaxies. For example, at $z=1$, a B -band filter samples mid-ultraviolet light ($\approx 0.22 \mu\text{m}$) and would be much more sensitive to young star-forming regions than it would be for nearby galaxies. Ideally, then, for comparison with nearby galaxies we would like to choose a redshifted band as close as possible to the *rest-frame* B -band. Even accounting for all these effects, significant differences between nearby and distant morphologies do exist. For example, van den Bergh et al. (2000) discuss the paucity of grand-design spirals and barred galaxies in the HDF-N, and use artificially redshifted images of nearby galaxies to demonstrate that the deficiencies are likely to be real.

Figure 46 shows several of the different categories of intermediate and high redshift galaxy morphologies, based on V and i -band images from the GEMS and Hubble UDF. The redshifts range from 0.42 to 3.35 and provide a wide range of look-back times. First, in such a range, some galaxies look relatively normal, as shown by the spiral and elliptical galaxies in the two upper left frames of Figure 46. The $z=0.59$ spiral is classifiable as type

SA(s)bc and the elliptical as type E3. The $z=0.99$ spiral shown in the middle right frame of Figure 46 has larger clumps, no clear central object, and more asymmetry than the $z=0.59$ spiral, but is still recognizable as a spiral. However, other less familiar categories are found. In general, high redshift galaxies are smaller than nearby galaxies on average (e.g., Elmegreen et al. 2007a=EEFM07).

“Chain galaxies” were first identified by Cowie et al. (1995) and are linear structures with superposed bright knots that have sizes and blue colors similar to normal late-type galaxies and relatively flat major axis luminosity profiles. They have the shapes of edge-on disk galaxies but lack clear bulges or nuclei. A recent study by Elmegreen, Elmegreen, & Sheets (2004=EES04) of faint galaxy morphologies (redshifts 0.5-2) in the Advanced Camera for Surveys (ACS) “Tadpole” galaxy (UGC10214) field showed that chain galaxies are the most common linear morphology at magnitudes fainter than $I=22$, accounting for more than 40% of the sample. Their dominance (also found by Cowie et al. 1995) is interpreted by EES04 as a selection effect because relatively optically thin edge-on galaxies are more favored to be seen near the limit owing to a higher projected surface brightness than for face-on versions of the same galaxies. EES04 suggest that chain galaxies are edge-on irregular galaxies that will evolve to late-type disk galaxies. Chains are the most flattened linear morphology at faint magnitudes.

“Clump clusters” (EES04) are somewhat irregular collections of blue knots or clumps with very faint emission between clumps. The clumps have sizes of ≈ 500 pc and masses of $\approx 10^8 - 10^9 M_\odot$. Both of the examples shown in Figure 46 have $z > 1$. Elmegreen, Elmegreen, & Hirst (2004=EEH04) identified clump clusters as the face-on counterparts of the linear chain galaxies, based on the similarities of the properties of the clumps with those seen in chain galaxies, and on the distribution of axis ratios of the systems as compared with normal disk galaxies. The lack of a bulge clump is also consistent with this conclusion.

Nevertheless, analysis of NICMOS IR images in the HUDF led Elmegreen et al. (2009a) to conclude that 30% of clump clusters and 50% of chain galaxies show evidence of young bulges, implying that at least half of these galaxies might be genuinely bulgeless. In a related study, Elmegreen et al. (2009b) show that the best local analogues of clump clusters are dwarf irregular galaxies like Ho II, scaled up by a factor of 10-100 in mass. This study also brought attention to clump clusters with faint red background disks, as opposed to blue clump clusters which lack such a feature. Elmegreen et al. argue that the red background clump clusters are part of an evolutionary sequence leading from the blue clump clusters to spirals with a “classical” bulge (e.g., KK04). The clumps, formed by gravitational instabilities in a turbulent disk, are large and few in number, and thus will eventually coalesce near the galaxy center if they survive the effects of supernova explosions (e. g., Elmegreen, Bournaud, & Elmegreen 2008).

“Tadpoles” (van den Bergh et al. 1996) are asymmetrically-shaped “head-tail” morphologies with a bright off-centered nucleus and a tail, like a tadpole. A rare local example is NGC 3991. Tadpoles were recognized in 3% of the galaxies in HDF-N and were found to be very blue in color. Usually both the head and the tail are blue, but van den Bergh et al. (1996) show one example where the head is red and the tail is blue. EEH04 showed that tadpoles have neither exponential major axis profiles nor clear bulges, and in their sample of linear objects, tadpoles are the least frequently seen.

The bottom frames of Figure 46 show bent chains and rings or partial rings (Elmegreen & Elmegreen 2006=EE06). The rings and partial rings are thought to be mostly collisional in nature (i.e., like the conventional ring galaxies shown in Figure 27) and show the different morphologies expected when small companions plunge through a larger disk galaxy in different ways (Appleton & Struck-Marcell 1996). Although bent chains resemble the partial rings, they lack offset nuclei and any evidence of a background, more face-on disk. EE06

suggest that bent chains are simply warped versions of the more common linear chains that have suffered an interaction. The ages of the bent chain clumps are younger than those found in rings and partial rings, and EE06 argue that relative separations and sizes of the clumps indicate they form by gravitational instabilities.

Elmegreen et al. (2005) show that approximately 1/3 of the ellipticals catalogued in the HUDF have prominent blue clumps in their centers (see also Menanteau et al. 2001, 2004). They argued that these clumps probably imply accretion events based on comparison of their magnitudes and colors with local field objects. Menanteau et al. (2001) were able to reproduce the color distributions with a model having a starburst superposed on a pre-existing older stellar population.

Galaxy morphology at intermediate and high redshifts also includes obvious interacting cases as well as possible merger morphologies. Bridges, tidal tails, plumes, and even M51 analogues are seen as in nearby galaxies, but are smaller in scale than for nearby objects (EEFM07). The middle frame of the bottom row shows a possible merger in progress of two bent chains (or, alternatively, two interacting spirals), called an “assembly galaxy” by EEFM07 because they appear to be assembling from smaller objects. EEH04 and EEFM07 also discuss the double systems, considered another category of the linear systems. The double systems like the $z=3.35$ one shown in Figure 46 are probably merging ellipticals. EEFM07 also describe “shrimp galaxies”, which appear to be interacting galaxies with a single curved arm or tail, curling at one end into a “body.”

Other studies of high redshift galaxy morphology have focussed on the specific redshift ranges that are selected by the UV drop-out technique. Conselice & Arnold (2009) examined the morphologies of galaxies in the $z=4-6$ range from the HUDF, and measured quantitative parameters such as the concentration-asymmetry-clumpiness (star formation) parameters (CAS; Conselice 2003) and other related parameters that are useful for distinguishing

mergers from normal galaxies. The CAS system is based on simple global parameters that are easily derived automatically for large numbers of galaxies. Conselice (2003) tied the C parameter to the past evolutionary history of galaxies while parameters A and S measure more active evolution from mergers and star formation. Conselice & Arnold found that half of the HUDF drop-out galaxies they studied have significant asymmetries and may be undergoing merging, while the other half is mainly smooth symmetric systems that may have collapsed quickly into a temporary, quiescent state.

Other quantitative approaches to these issues include the Sersic n index that characterizes radial luminosity profiles (Ravindranath et al. 2006; Elmegreen et al. 2007b) and the Gini coefficient (Abraham et al. 2003; Lotz et al. 2006). The Gini coefficient provides a way of quantifying high redshift morphology that does not depend on galaxy shape or the existence of a well-defined center, and is well-suited to the kinds of objects shown in Figure 46. Lotz et al. (2006) found in a sample of 82 Lyman break galaxies that 10-25% are likely mergers, 30% are relatively undisturbed spheroids, and the remainder are disks, minor mergers, or post-mergers.

Given the rise in peculiar and irregular-shaped galaxies with increasing redshift, the question naturally arises: when did the Hubble sequence and all its accompanying details fall into place? This question is considered by Conselice et al. (2004), who quantitatively analyzed a well-defined high redshift sample using the CAS system. Conselice et al. identify “luminous diffuse objects” (LDOs) as galaxies having C less than 1σ below the average, and “luminous asymmetric objects” (LAOs) as galaxies having $A > S$. Some of both classes of objects are covered by the Elmegreen et al. categories described above. All of the LDOs and LAOs have $M_B < -19$, and Conselice et al. suggest such objects might be the precursors of modern disk and elliptical galaxies. These are found in the redshift range $0.2 < z < 2$, suggesting the present day Hubble sequence began taking shape in this interval.

Conselice et al. (2008) consider the morphologies of galaxies more massive than $10^{10} M_{\odot}$ and in the range $1.2 < z < 3$. To a z_{850} magnitude of 27, the majority of these galaxies are peculiar. They conclude that such galaxies undergo 4.3 ± 0.8 mergers to $z=3$.

14. Giant Low Surface Brightness Galaxies

The van den Bergh luminosity classes highlight how luminosity and surface brightness generally go together. Low surface brightness usually means low luminosity and small size, hence a dwarf classification. However, the discovery of rare giant low surface brightness (GLSB) galaxies by Bothun et al. (1987) shows that morphology can sometimes be misleading for judging absolute luminosity. The hallmarks of these objects are a relatively normal bulge and an extremely low surface brightness, very large disk. Disk radial scalelengths and luminosities are unusually large, and extrapolated disk central surface brightnesses are unusually faint, compared to more normal spirals. The disks tend to be relatively smooth with a few large, isolated HII regions. Bothun et al. (1987) point to a model whereby the disks of these galaxies have such a low gas surface density that they are largely unevolved, due to the inefficiency of star formation.

GLSB galaxies can be classified within the Hubble-Sandage and de Vaucouleurs classification systems although, as noted by McGaugh, Schombert, and Bothun (1995), the majority are classified later than stage Sc. Bulges, bars, rings, and spiral patterns are evident in some examples, in spite of the low disk surface brightness. Figure 47 shows three of the originally recognized GLSB examples (McGaugh, Schombert, & Bothun 1995): Malin 2 (also known as F568–6), UGC 1230, and UGC 6614. In the images, the length of a side is 131, 38, and 77 kpc, respectively. These can be compared to the giant normal spiral NGC 7531 in the far right frame, where the length of a side is also 38 kpc. Malin 2 and UGC 6614 are especially enormous physical objects. UGC 1230 is also very large for

such a late-type morphology. van den Bergh (1998) likens the size of Malin 2 to the core of a cluster of galaxies. He considers “monsters” like Malin 1 and Malin 2 to be only one of three types of LSB galaxies. Some LSB galaxies are as big as normal galaxies, like UGC 1230. Most LSB galaxies, however, are dwarfs: ellipticals, irregulars and, less frequently, spirals. These are described further in section 15.2.

An example of another object that could be considered a large LSB galaxy, but which lacks a bulge or any evident recent star formation, is SGC 2311.8–4353, the mysterious ghost-like companion close to the right of NGC 7531 in Figure 47. This peculiar object is 2/3 the size of NGC 7531 (Buta 1987) but has unknown redshift. If it is associated with NGC 7531, it would be as much as 30 kpc in diameter at the faintest detectable isophote level and would clearly not be a dwarf.

A recent study of three GLSBs (Malin 1, UGC 6614, and UGC 9024) by Rahman et al. (2007) showed that IR emission from such objects is consistent with their optically-determined low star formation rates, with the diffuse optical disks being undetected from two of the three. A dynamical study of two GLSBs (Malin 1 and NGC 7589) by Lelli, Fraternali, & Sancisi (2010) led the authors to conclude that at least in these cases, the GLSB galaxy can be thought of as an inner high surface brightness galaxy having a very extended LSB disk. This is based on the steeply rising rotation curves found for these galaxies, which is very much like what is seen in early-type high surface brightness galaxies.

Impey & Bothun (1997) argue that LSB galaxies brighter than $M_B = -14$ contribute significantly to the luminosity density of the local universe, are dark-matter-dominated at almost all radii, and have an evolutionary history involving late collapse of a low amplitude perturbation, a low star formation rate, and very slow changes. Large LSBs are greatly underrepresented in galaxy catalogues but are clearly an important class of objects.

15. Galaxy Morphology in Color

15.1. Normal Galaxies

The Sloan Digital Sky Survey (York et al. 2000; Gunn et al. 1998) provides the largest body of information on the colors of galaxies. The multi-wavelength imaging in *ugriz* filters has allowed the production of high quality color images for thousands of galaxies. Although the Hubble-Sandage-de Vaucouleurs classification systems were based on blue light images alone, it is still possible to reliably classify galaxies with SDSS color images, which are based on combined *gri* images (Lupton et al. 2004). In such images one can directly see the stellar population differences that characterize different galaxy types.

Figure 48 shows the color Hubble sequence from E to Sm. Once galaxy colors were systematically measured using photoelectric photometry (de Vaucouleurs, de Vaucouleurs, & Corwin 1976), it was noted that integrated colors vary smoothly with advancing stage along the Hubble sequence. The latest stages have corrected total color index $(B - V)_T^c \approx 0.3-0.4$ while E and S0 galaxies have $(B - V)_T^c \approx 0.9-1.0$ (e.g., Buta et al. 1994). The latter colors correspond to yellow-orange while the former are bluish-white. The colors begin to change at S0/a and Sa and become progressively bluer. Figure 48 shows the reason for the change. Galaxies earlier than Sa are dominated by old stars having the colors of K giants. As stage advances from Sa to Sm, the spiral structure becomes progressively more important compared to the bulge. Since the arms are dominated by complexes of massive young stars, this makes the integrated colors of the galaxies become progressively bluer until by the end of the sequence, the bluer colors of these stars have overcome the yellowish light of the background old disk stars. Figure 48 also shows that the intermediate colors of intermediate types such as Sb and Sc are due to the yellowish-orange colors of bulges and bars as combined with the bluer colors of spiral arms.

The analysis of integrated SDSS galaxy colors for more than 100,000 galaxies led to one of the most dramatic findings of the survey: a clear bimodality in the distribution of color that correlates with morphology: a red peak that includes mainly E, S0, and Sa galaxies, and a blue peak that includes mainly Sb, Sc, and Irr galaxies (Strateva et al. 2001). Although the correlation of galaxy color with types had been known for a long time from photoelectric measurements (e. g., de Vaucouleurs 1961; Buta et al. 1994), the large sample provided by SDSS allowed the bimodality to be demonstrated to a high degree of significance. In plots of $u - r$ color index versus absolute M_r magnitude, the galactic equivalent of a stellar H-R diagram, nearby early-type galaxies follow a narrow band called the red sequence, while nearby later-type, mostly star-forming galaxies appear as a broad blue sequence (also sometimes called the “blue cloud”). Baldry et al. (2004) showed that the bimodality (in the form of a double Gaussian number distribution over all types) is detectable from $M_r \approx -15.5$ to $M_r \approx -23$, being undetectable only for the most luminous galaxies. Wyder et al. (2007) showed that use of GALEX near-ultraviolet magnitudes and optical r -band magnitudes provides even greater discrimination between the Gaussian components. Bell et al. (2004) showed that the bimodality is detectable in faint galaxies to $z \approx 1$, indicating that this characteristic of the galaxy population extends to a lookback time of at least 9Gyr. It is thought that galaxies evolve from the blue sequence to the red sequence as their star formation is quenched, perhaps through mergers, gas depletion, or AGN feedback (e.g., Martin et al. 2007). The possibility of evolution has engendered great interest in the galaxies lying near the minimum of the bimodal distribution (the so-called “green valley”; Thilker et al. 2010 and references therein).

15.2. Dwarf Galaxies

Virtually all the galaxies shown in Figure 48 are of relatively high luminosity, with absolute blue magnitudes M_B^o averaging about -20 . When physical parameters such as M_B^o are considered, it becomes clear that the peculiar shape of the de Vaucouleurs classification volume shown in Figure 3 only highlights the morphological diversity of families and varieties at each stage, but does not tell us about the *physical parameter space* at each stage, which expands considerably at each end of the volume (McGaugh, Schombert, and Bothun 1995). Most known dwarf galaxies are either early or late-type, but not intermediate.

15.2.1. *dE, dS0, BCD, and cE Galaxies*

The most extensive study of dwarf galaxy morphologies was made by Binggeli, Sandage, & Tammann (1985=BST), who used deep photographs to probe the low luminosity population of the Virgo Cluster, using mostly morphology to deduce cluster membership. Examples of several categories of Virgo Cluster dwarf galaxies are shown in Figure 49 using SDSS color images and the classifications of BST. The most common type is the dwarf elliptical, or dE type, which accounts for 80% of the galaxies in the BST catalogue. dE galaxies range from $M_B = -18$ to -8 (Ferguson & Binggeli 1994). Many dEs have an unresolved, star-like nucleus whose presence is indicated by an N attached to the type, as in dE0,N. The top right panels of Figure 49 show three fairly typical examples. Possibly related to these normal dE systems are the larger, lower surface brightness ellipticals (“large dE”) shown in the two lower right frames of Figure 49.

The second row of Figure 49 shows examples of the interesting class of dwarf S0 galaxies. All of the examples shown are distinct from dEs in showing a smooth structure but with additional features such as a lens or a weak bar. dS0 galaxies can also be nucleated

and are called dS0,N. In addition to the low surface brightness dEs and dS0s, the Virgo Cluster includes two high surface brightness classes of dwarfs. The cE category refers to compact ellipticals that resemble M32.

The blue compact dwarf (BCD) galaxies are a special class of star-forming dwarf irregulars characterized by a few bright knots imbedded in a stellar background of low surface brightness (Sandage and Binggeli 1984). The most extreme cases are nearly stellar (Thuan & Martin 1981). The knots are often super star clusters associated with 30-Doradus-like HII regions, and the faint background can be very blue (Thuan et al. 1997). Spectroscopically, BCDs have narrow emission lines superposed on a blue continuum, and the lines indicate a low metallicity. Figure 49 shows three examples from the BST Virgo Cluster catalogue. Gil de Paz et al. (2003) present an atlas of more than 100 BCDs that highlight their structure.

As described in section 5.1, the dE galaxies shown in Figure 49 are *not* the low luminosity extension of more luminous ellipticals. These together with the dS0 class are labeled “spheroidal” galaxies by Kormendy et al. (2009; see Figure 6), who confirmed the finding by Kormendy (1985) that these galaxies are more related to evolved low luminosity spirals and irregulars than to genuine ellipticals. Based on correlations of well-defined photometric parameters (e.g., central surface brightness or velocity dispersion versus core radius or absolute magnitude), these authors link ellipticals like M32 to the actual low luminosity end of the E galaxy sequence (see also Wirth & Gallagher 1984). Thus, the cE galaxies shown in Figure 49 are in a sense truer “dwarf ellipticals” than the dE galaxies shown. This does not negate the value of the BST classifications, since these are purely morphological interpretations.

15.2.2. *Local Group Dwarf Spheroidals and Irregulars*

The lowest luminosity galaxies that we can study in detail are in the Local Group. Fortunately, a few are in the area covered by the SDSS so that they can be illustrated in color. These objects, all fainter than $M_V = -12$, are shown in Figure 50. Leo I and Leo II are usually called dwarf spheroidal, or dSph, galaxies (e.g., Ferguson & Binggeli 1994). dSph galaxies tend to have absolute visual magnitudes $M_V > -15$ and a low degree of flattening; they are believed to be the most abundant type of galaxy in the Universe. Leo I ($M_V = -11.9$) and Leo II ($M_V = -9.6$) look different in part because of their different star formation histories. dSph and dwarf irregular (dI) galaxies are now known to have complex and varied star formation histories that may involve multiple episodes of star formation and effects of interactions (Mateo 1998 and references therein). The other two galaxies in Figure 50, Leo A and DDO 155, are dwarf irregulars having $M_V \approx -11.5$. A detailed HST study of the stellar content of Leo A (Cole et al. 2007) showed that 90% of the star formation in the galaxy occurred less than 8 Gyr ago, with a peak at 1.5-3 Gyr ago. A useful summary of the properties of dSph galaxies is provided by van den Bergh (1998) and, most recently, by Tolstoy, Hill, & Tosi (2009), who also discuss the star formation histories of Local Group dI galaxies.

The SDSS has facilitated the discovery of many new Local Group dwarf galaxies (Belokurov et al. 2007). For example, the SDSS led to the discovery of one of the faintest known dSph galaxies, a new dwarf in Ursa Major (called the UMa dSph) having $M_V \approx -7$ (Willman et al. 2007). Most interesting is Leo T, which is an $M_V = -7.1$ dSph galaxy with some recent star formation, providing one of the most dramatic illustrations of the link between dSph and dI galaxies, and the least luminous galaxy known to have recent star formation (Irwin et al. 2007).

15.2.3. Dwarf Spirals

Sandage & Binggeli (1984) described the classification of dwarf galaxies based on the Virgo Cluster, and concluded that there are “no real dwarf spirals.” This refers mainly to dwarf spirals that might be classified as types Sa, Sb, or Sc, i.e., having both a bulge and a disk. Dwarf late-type spirals are already built into de Vaucouleurs’s modified Hubble sequence as Sd-Sm types and connect directly to Magellanic irregulars, as shown in Figure 1 of Sandage & Binggeli (1984). Thus, any genuine examples of dwarf Sa, Sb, or Sc spirals would be of great interest as they would challenge the idea that for a galaxy to be able to make well-defined spiral arms, it would have to be more massive than some lower limit (estimated as $5 \times 10^9 M_\odot$ by Sandage & Binggeli).

Four of the best cases of genuine dwarf spirals are illustrated in Figure 51. The two rightmost frames show IC 783 (BST type dS0,N) and IC 3328 (BST type dE1,N), both Virgo Cluster members having absolute magnitudes $M_B^o \approx -16$ to -17 , and found to have subtle spiral structure by Barazza, Binggeli, & Jerjen (2002) and Jerjen, Kalnajs, & Binggeli (2000), respectively. The patterns are hard to see in the direct SDSS color images shown in Figure 51, but these authors use photometric models, Fourier decomposition, and unsharp-masking to verify the reality of the patterns. Barazza et al. conclude that many of the bright early-type dwarfs in the Virgo Cluster have disks. An example with a bar *and* spiral arms is NGC 4431 (shown as dS0 in Figure 49).

The leftmost panel of Figure 51 shows an HST wide V-band image (Carollo et al. 1997) of NGC 3928, an absolute magnitude $M_B^o = -18$ galaxy which on small-scale, overexposed images looks like an E0, but which harbors a miniature (2kpc diameter), low-luminosity Sb spiral (van den Bergh 1980b). Based on spectroscopic analysis, Taniguchi & Watanabe (1987) have suggested that NGC 3928 is a spheroidal galaxy which experienced an accretion event that supplied the gas for star formation in the miniature disk.

Schombert et al. (1995) brought attention to possible dwarf field spirals. One of their examples, D563–4, is shown in the second frame from the left in Figure 51. This galaxy has $M_B^o \approx -17$. A few other examples are given in the paper, and Schombert et al. find that they are not in general grand design spirals, are physically small, and have low HI masses. However, van den Bergh (1998) considers all of Schombert et al.’s examples as subgiant spirals rather than true dwarf spirals. A possible true dwarf spiral given by van den Bergh is DDO 122 (type S V).

15.3. Galaxy Zoo Project

The Galaxy Zoo project (Lintott et al. 2008) has made extensive use of SDSS color images. The project uses a website to enlist the help of citizen scientists worldwide to classify a million galaxies as well as note interesting and unusual cases in various forum threads. With such a large database to work from, and the potential for discovery being real, the project has attracted many competent amateur galaxy morphologists. One such discovery was a new class of galaxies called “green peas,” which are star-like objects that appear green in the SDSS composite color images (Figure 52, left). Cardemone et al. (2009) used auxiliary SDSS data to show that peas are galaxies that are green because of a high equivalent width of [OIII] 5007 emission. They are sufficiently distinct from normal galaxies and quasars in a two-color $g - r$ vs. $r - i$ plot that such a plot can be used to identify more examples. Other characteristics noted are that peas are rare, no bigger than 5 kpc in radius, lie in lower density environments than normal galaxies, but may still have morphological characteristics driven by mergers, are relatively low in mass and metallicity, and have a high star formation rate. Cardemone et al. conclude that peas are a distinct class of galaxies that share some properties with luminous blue compact galaxies and UV-luminous high redshift galaxies.

Another prominent colorful galactic-sized object identified by Galaxy Zoo is “Hanny’s Voorwerp” (Figure 52), a peculiar collection of blue clumps just south of IC 2497. Lintott et al. (2009) found that the Voorwerp is mostly ionized gas, and after ruling out some possible sources of ionizing radiation, concluded that the object could be the first identified case of a quasar light echo. The implication is that the companion galaxy underwent a temporary quasar phase.

Masters et al. (2010) examine the properties of face-on late-type spiral galaxies whose colors are much redder than is typical (Figure 52, right panels), suggesting that they are passive objects where star formation has largely ceased or is lower than normal. These authors showed that red spirals are not excessively dusty and tend to be near the high end of the mass spectrum. A range of environmental densities was found, implying that environment alone is not sufficient to make a spiral red. A significantly higher bar fraction was found for red spirals as compared to blue spirals, which Masters et al. suggest could mean the bars themselves may have acted to shut down the star formation in these galaxies.

A major philosophical aspect of Galaxy Zoo is the value of human visual interpretation of galaxy morphology. That is, the human eye can integrate the detail in an image more reliably than a computer program can, in spite of the latter’s ability to classify numbers of galaxies well beyond the capability of a single individual. This philosophy was used to compile a major catalogue of galaxy merger pairs described by Darg et al. (2010). In the initial set-up of Galaxy Zoo, a single button allowed a classifier to select whether an object was a “merger” based simply on the appearance of peculiarities. For each galaxy, a weighted average number, f_m , was derived that characterized the fraction of classifiers who interpreted a pair of galaxies as a merger, essentially “morphology by vote” and in a way reminiscent of RC3 where morphological types were in many cases based on a weighted average from a small number of classifiers (Buta et al. 1994). Taking $f_m > 0.4$, Darg et al.

(2004) identified 3003 pairs and groups of merging galaxies, and also showed that the spiral to elliptical galaxy ratio in merger pairs is a factor of two higher than for the global galaxy population, suggesting that mergers involving spirals are detectable for a longer period than those that do not involve spirals.

A similar philosophy to Galaxy Zoo was used by Buta (1995) to compile the Catalogue of Southern Ringed Galaxies, and also by Schawinski et al. (2007), who visually classified 48,023 SDSS galaxies to identify a significant-sized sample of early-type galaxies for a study of the connection between nuclear activity and star formation. In the latter study, visual interpretation was argued to be needed to avoid bias against star-forming early-type galaxies which would be excluded from color-selected samples. A major result of this study was the identification of a time sequence whereby an early-type galaxy has its star formation suppressed by nuclear activity, a manifestation of AGN feedback.

15.4. Isolated Galaxies

If interactions and mergers can have profound effects on galaxy morphology, then the morphology of *isolated* galaxies clearly is of great interest. Such galaxies allow us to see how internal evolution alone affects morphology, i. e., what pure “nature” morphologies look like. Karachentseva (1973) compiled a large catalogue (the Catalogue of Isolated Galaxies, or CIG) of 1050 isolated galaxies that has proven very useful for examining this issue. A galaxy of diameter D is suggested to be isolated if it has no comparable-sized companions of diameter d between $D/4$ and $4D$ within a distance of $20d$. Verdes-Montenegro et al. (2005) show that this means that an isolated galaxy 25 kpc in diameter, in the presence of a typical field galaxy velocity of 150 km s^{-1} , has not been visited by a comparable mass companion during the past 3Gyr. These authors discuss the limitations of the CIG (e. g., the isolation criteria do not always work), but in general it is the best source of isolated

galaxies available.

Sulentic et al. (2006) examined all 1050 CIG galaxies on Palomar II sky survey charts in order to refine the sample and found that isolated galaxies cover all Hubble types. Of these, 14% were found to be E/S0 types, while 63% were Sb-Sc types, with the spiral population more luminous than the E/S0 population. Over the type range Sa-Sd, the proportion rises to 82%. Thus, an isolated galaxy sample is very spiral-rich. Nevertheless, the presence of early-type galaxies in the sample implies that these are not likely to be “nurture” formed, as such galaxies might be in denser environments. The refinement of the CIG sample forms the basis of the Analysis of the Interstellar Medium of Isolated Galaxies (AMIGA) project (Verdes-Montenegro et al. 2005).

Figure 53 shows six examples of isolated Sb-Sc galaxies from the AMIGA sample, based on SDSS color images. All of these look relatively normal, but it is interesting how nonbarred galaxies like NGC 2649 and 5622 (upper left frames in Figure 53) show such conspicuous global spirals, which argues that the spirals in these galaxies have not been excited by an interaction.

Durbala et al. (2008) analyzed the photometric properties of 100 isolated Sb-Sc AMIGA galaxies, and found that a majority have pseudobulges rather than classical bulges. In comparing the properties of isolated galaxies with a sample of Sb-Sc galaxies selected without an isolation criterion, Durbala et al. found that isolated spirals have longer bars and, using CAS parameters, also less asymmetry, central concentration, and clumpiness,

Durbala et al. (2009) analyzed the Fourier properties of the same set of 100 isolated spirals, and estimated bar lengths and strengths. Earlier types in the sample were found to have longer and higher contrast bars than later types. Spiral arm multiplicities were investigated also, and it was shown that cases having an inner $m=2$ pattern and an outer $m=3$ pattern occurred in 28% of the sample. Elmegreen, Elmegreen, & Montenegro (1992)

argued that in such morphologies, the $m=3$ pattern is driven internally by the $m=2$ pattern, and that three-armed patterns measure the time elapsed since an interaction.

15.5. Deep Field Color Imaging

Particularly interesting in the domain of color galaxy morphology are the various deep field surveys that have been at the heart of high redshift studies. The most recent is the HST Wide Field Camera 3 Early Release Science (ERS) data (Windhorst et al. 2010), which provides very deep panchromatic images based on 10 filters ranging from $0.2\mu\text{m}$ to $2\mu\text{m}$ in wavelength. Figure 54 shows three subsections of the main ERS field, which coincides with the GOODS south field (Giavalisco et al. 2004). The galaxies seen range in redshift from $z=0.08$ to at least $z=3$. Windhorst et al. (2010) argue that images like the ERS field are deep enough to allow probing of galaxy evolution in the crucial redshift range $z\approx 1-3$ where the galaxies assembled into their massive shapes. By $z\approx 1$, the Hubble sequence was largely in place. Figure 54 shows a variety of interesting nearby as well as high z morphologies, including some of those illustrated in Figure 46. Images like the ERS field allow us to connect the local and distant galaxy populations in unprecedented detail.

16. Large-Scale Automated Galaxy Classification

The process of galaxy classification thus far described is a manual exercise where an observer attempts to sort a galaxy into its appropriate stage, family, variety, outer ring classification, etc., by visual inspection alone. For a small number of observers, this has been done for as many as 14,000 galaxies by Nair & Abraham (2010) and 48,000 galaxies by Schawinski et al. (2007), while for a large number of observers working in concert (e.g., the Galaxy Zoo project) it has been done for a million galaxies. But critical to such ventures

is the preparation of images for classification, and a need for a homogeneous, objective approach to very large numbers of galaxies. This has led to extensive application of automated methods for classifying galaxies. For example, Nair & Abraham (2010) visually classified galaxies into coded bins for the purpose of training an automatic classification algorithm.

(The remainder of this part will be found in the printed publication.)

17. The Status and Future of Morphological Studies

The large number of illustrations in this article attests to the richness of the diversity of galaxy morphology. It is, of course, not possible to illustrate all aspects of morphology that might be worth discussing, but most interesting is how far *physical galaxy morphology* has come in the 35 years since Allan Sandage wrote his review of galaxy morphology in Volume IX of *Stars and Stellar Systems*. Galaxy morphology is no longer the purely descriptive subject it once used to be.

Internal perturbations such as bars are apparently capable of generating a great deal of the interesting structure we see in disk galaxies, and more theoretical and observational studies should elucidate this further. The impact of bars on morphology seems well understood, as summarized in detail by KK04 in their monumental review article on pseudobulges. Bars redistribute angular momentum and reorganize gas clouds to flow into resonance regions and fuel star formation. The gathering of gas into resonance regions can drive the formation of rings, and indeed can also build up the central mass concentration to the point of bar destruction. Even failing this, the pile-up of gas into the nuclear region can lead to the formation of a pseudobulge. The richness of barred galaxy morphology attests to the strong role secular evolution plays in structuring galaxies.

Progress in understanding the role of mergers and interactions on galaxy morphology has also proceeded at a rapid pace. Great success in numerical simulations and the theory of interacting galaxies has made it possible to link a specific type of interaction to a specific morphology (e. g., collisional ring galaxies). The complex structure of early-type galaxies, with boxy and disk isophote shapes, shells and ripples, and other features, shows that interactions and mergers play an important role in molding galaxies (see the excellent review by Schweizer 1998). With the advent of the Hubble Space Telescope, this role has been elucidated even more clearly because the merger rate was higher in the past.

In spite of the theoretical progress, it is interesting that classical morphology has not lost its relevance or usefulness even after more than 80 years since Hubble published his famous 1926 paper. No matter how much progress in understanding the physical basis for morphology is made, there is still a need for the ordering and insights provided by classical Hubble-Sandage-de Vaucouleurs galaxy classifications. Morphology went through a low phase in the 1980s and 90s when it was perceived that galaxy classification placed too much emphasis on unimportant details and was too descriptive to be useful. It was thought that the Hubble classification had gone as far as it can go, and that another approach needed to be tried to build a more physical picture of galaxies. At that time, there was a sense that the focus should be more on the component “building blocks” of galaxies, or what might be called galactic subsystems (e.g., Djorgovski 1992). Quantification of morphology became more possible as advanced instrumentation allowed more detailed physical measurements to be made. In the end, as morphology became better understood, it also became clear what a type such as “(R)SB(r)ab” might really mean, which enhanced the value of classification (KK04). In addition, numerical simulations became sophisticated enough to make predictions about morphology (e.g., the R_1 and R_2 subclasses of outer rings and pseudorings). These types of things, as well as the movement of morphology from the photographic domain to the digital imaging domain, the broadening of the

wavelength coverage available to morphological studies from the optical to the ultraviolet and infrared domains, the Sloan Digital Sky Survey, and the accessibility of high redshift galaxies to unprecedentedly detailed morphological study, all played a role in bringing galaxy morphology to the forefront of extragalactic research.

Even so, the writing of this article has shown that many important galaxies and classes of galaxies have not been studied well enough to have much modern data available. For example, in spite of the considerable interest in collisional ring galaxies the past 20 years or so, Struck (2010) was forced to lament that ring galaxies “are underobserved.” The same can be said for resonance ring galaxies, giant low surface brightness galaxies, dwarf spirals, Magellanic barred spirals, counter-winding spirals, and other classes of interacting galaxies. The most that can be said about this is that further studies will likely be made, especially if instrumentation facilitates the objects in question. Rotation and dynamics are far short of photometry for most classes of galaxies, but would add a great deal of insight if obtainable.

At the other extreme, early-type (E and S0 galaxies) continue to be the focus of major photometric, kinematic, and theoretical research projects. Important clues to the formation and evolution of such galaxies are contained in their intrinsic shapes (oblate, prolate, triaxial), in the ages, metallicities, and radial mass-to-light ratios of their stellar populations, in their three-dimensional orbital structure, and in the kinematic peculiarities often found in such systems (de Zeeuw et al. 2002). Among the most recent studies are the massive photometric analysis of early-types in the Virgo Cluster by Kormendy et al. (2009), and the ATLAS^{3D} project described by Cappellari et al. (2011). ATLAS^{3D} is the largest kinematic database of high-quality two-dimensional velocity field information ever obtained for early-type galaxies, including 260 such galaxies in a well-defined and complete sample. This survey is simply the latest part of the long-term effort by many researchers, beginning in the 1980s, to understand early-type galaxies in terms of quantitative parameters that can

be tied to theoretical models. Early-types have been a persistent enigma in morphological studies, and considerable evidence suggests that the E, S0 sequence as defined by Hubble, Sandage, and de Vaucouleurs hides a great deal of important physics associated with these objects. The ATLAS^{3D} project was designed to exploit the λ_R parameter described by Emsellem et al. (2007; see section 5.1), which separates early-types into fast and slow rotators and discriminates galaxies along the red color sequence (section 15.1).

These advances for early-type galaxies do not mean that quantitative analyses of later-type galaxies are lacking. As codes for two-dimensional photometric decomposition become ever more sophisticated (e. g., Peng et al. 2010; Laurikainen et al. 2010 and references therein), parameters that characterize the bulges, disks, bars, lenses, rings, and spiral patterns are being derived for large numbers of galaxies (especially barred galaxies) that were not reliably decomposable with earlier one-dimensional approaches.

For the future, it is to be hoped that the Sloan Digital Sky Survey will be extended to cover the whole sky, and provide access to high quality morphological studies of several million more galaxies, some of which might have new and exotic structures. The *James Webb Space Telescope* should be able to carry the HST’s torch to greater depths and resolutions of high redshift galaxies, to further enhance our understanding of galaxy evolution.

This article is dedicated to Allan Sandage (1926-2010), one of the 20th century’s greatest astronomers, who helped set the stage for galaxy morphology to be one of the most active fields of modern extragalactic research. It was Dr. Sandage’s efforts that firmly cemented Hubble’s ideas on morphology into astronomy. The author is grateful to Dr. Sandage for the inspiration he provided for this article and for his standard of excellence in astronomy.

The author also gratefully acknowledges the helpful comments and suggestions from the

following people that considerably improved this article: Martin Bureau, Adriana Durbala, Debra Elmegreen, William Keel, Jeffrey Kenney, Johan H. Knapen, Rebecca Koopmann, John Kormendy, Eija Laurikainen, Barry Madore, Karen L. Masters, Patrick M. Treuthardt, Sidney van den Bergh, and Xiaolei Zhang. The author also thanks Debra Elmegreen for providing the images of high redshift galaxies shown in Figure 46, Masfumi Yagi for the illustrations in Figure 29, and John Kormendy, Jason Surace, Donald P. Schneider, and Rogier Windhorst for the use of published illustrations from specific papers. This article uses images from many sources too numerous to acknowledge here, but mainly drawn from the dVA, the NASA/IPAC Extragalactic Database, the Ohio State University Bright Spiral Galaxy Survey (OSUBSGS), the Sloan Digital Sky Survey, and several published papers by other authors. The NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, under contract with the National Aeronautics and Space Administration. Funding for the OSUBSGS was provided by grants from the NSF (grants AST 92-17716 and AST 96-17006), with additional funding from the Ohio State University. Funding for the creation and distribution of the SDSS Archive has been provided by the Alfred P. Sloan Foundation, the Participating Institutions, NASA, NSF, the U.S. Department of Energy, the Japanese Monbukagakusho, and Max Planck Society. Observations with the NASA/ESA *Hubble Space Telescope* were obtained at the Space Telescope Science Institute, which is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under contract NAS 5-26555. The *Spitzer Space Telescope* is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, under NASA contract 1407. The *Two Micron All-Sky Survey* is a joint project of the University of Massachusetts and the Infrared Processing and Analysis Center/California Institute of Technology, funded by the National Aeronautics and Space Administration and the National Science Foundation. GALEX is a NASA mission operated by the Jet Propulsion Laboratory. GALEX data is from the Multimission Archive at the Space Telescope Science

Institute (MAST). Support for MAST for non-HST data is provided by the NASA Office of Space Science via grant NNX09AF08G and by other grants and contracts. This article has also made use of THINGS, “The HI Nearby Galaxy Survey” (Walter et al. 2008), and BIMA-SONG, the Berkeley-Illinois-Maryland Survey of Nearby Galaxies (Helfer et al. 2003).

REFERENCES

- Abraham, R. G., van den Bergh, S., Glazebrook, K., Ellis, R. S., Santiago, B. X., Surma, P., & Griffiths, R. E. 1996, *ApJS*, 107, 1
- Abraham, R. G., van den Bergh, S., & Nair, P. 2003, *ApJ*, 588, 218
- Aguerri, J. A. L., Méndez-Abreu, J., & Corsini, E. M. 2009, *A&A*, 495, 491
- Appleton, P. & Struck-Marcell, C. 1996, *Fundamentals of Cosmic Physics*, 16, 111
- Arp, H. 1966, *ApJS*, 14, 1
- Arp, H. C. & Madore, B. F. 1987, *Catalogue of Southern Peculiar Galaxies and Associations*, Cambridge, Cambridge Univ. Press
- Arribas, S., Bushouse, H., Lucas, R. A., Colina, L., & Borne, K. D. 2004, *AJ*, 127, 2522
- Athanassoula, E. 1992, *MNRAS*, 259, 328
- Athanassoula, E. 2003, *MNRAS*, 341, 1179
- Athanassoula, E. 2005, *MNRAS*, 358, 1477
- Athanassoula, E. & Bosma, A. 1985, *ARA&A*, 23, 147
- Athanassoula, E. et al. 1990, *MNRAS*, 245, 130
- Athanassoula, E., Romero-Gómez, M., & Masdemont, J. J. 2009a, *MNRAS*, 394, 67

- Athanassoula, E., Romero-Gómez, M., Bosma, A., & Masdemont, J. J. 2009b, MNRAS, 400, 1706
- Bacon, R. et al. 2001, MNRAS, 326, 23
- Bagetakos, I. Brinks, E., Walter, F., de Blok, W. J. G., Rich, J. W., Usero, A., & Kennicutt, R. C. 2009, in *The Evolving ISM in the Milky Way and Other Galaxies*, K. Sheth, A. Noriega-Crespo, J. Ingalls, and R. Paladini, eds., <http://ssc.spitzer.caltech.edu/mtgs/ismevol>, E17
- Bagley, M., Minchev, I., & Quillen, A. C. 2009, MNRAS, 395, 537
- Bahcall, J. N., Kirhakos, S., Saxe, D. H., & Schneider, D. P. 1997, ApJ, 479, 642
- Baldry, I. K., Glazebrook, K., Brinkmann, J., Ivezić, Z., Lupton, R. H., Nichol, R. C., & Szalay, A. S. 2004, ApJ, 600, 681
- Banerji, M. et al. 2010, MNRAS, 406, 342
- Barazza, F. D., Binggeli, B., & Jerjen, H. 2002, AJ, 124, 1954
- Barazza, F. D., Jogee, S., & Marinova, I. 2008, ApJ, 675, 1194
- Barway, S., Khembavi, A., Wadadekar, Y., Ravikumar, C. D., & Mayya, Y. D. 2007, ApJ, 661, L37
- Barway, S., Wadadekar, Y., & Khembavi, A. K. 2011, MNRAS, 410, L18
- Beckwith, S. V. W. et al. 2006, AJ, 132, 1729
- Bell, E. et al. 2004, ApJ, 608, 752
- Belokurov, V. et al. 2007, ApJ, 654, 897
- Bershady, M., Jangren, A., & Conselice, C. J. 2000, AJ, 119, 2645

- Bertin, G., Lin, C. C., Lowe, S. A., & Thurstans, R. P. 1989, *ApJ*, 338, 78
- Bertola, F. 1987, in *IAU Symp.* 127, p. 135
- Bertin, G. & Amorisco, N. C. 2010, *A&A*, 512, 17
- Binggeli, B., Sandage, A., & Tammann, G. A. 1985, *AJ*, 90, 1681
- Binney, J. 1992, *ARA& A*, 30, 51
- Blakeslee, J. P. 1999, *AJ*, 118, 1506
- Block, D. L., Bertin, G., Stockton, A., Grosbol, P., Moorwood, A. F. M., Peletier, R. F. 1994, *A&A*, 288, 365
- Block, D., Freeman, K. C., Puerari, I., Combes, F., Buta, R., Jarrett, T., & Worthey, G. 2004a, in *Penetrating Bars Through Masks of Cosmic Dust*, eds. D. L. Block, I. Puerari, K. C. Freeman, R. Groess, & E. Block, Springer, Kluwer, p. 15
- Block, D. L., Freeman, K. C., Jarrett, T. H., Puerari, I., Worthy, G., Combes, F., & Groess, R. 2004b, *A&A*, 425, L37
- Block, D. L., Puerari, I., Elmegreen, B. G., Elmegreen, D. M., Fazio, G. G., & Gehrz, R. D. 2009, *ApJ*, 694, 115
- Book, L. G. & Benson, A. J. 2010, *ApJ*, 716, 810
- Bothun, G., Impey, C. D., Malin, D. F., & Mould, J. R. 1987, *AJ*, 94, 23
- Bournaud, F. & Combes, F. 2002, *A&A*, 392, 83
- Brook, C., Governato, F., Quinn, T., Wadsley, J., Brooks, A. M., Willman, B., Stilp, A., & Jonsson, P. 2008, *ApJ*, 689, 678
- Bureau, M., Aronica, G., Athanassoula, E., Dettmar, R.-J., Bosma, A., Freeman, K. C.

2006, MNRAS, 370, 753

Bush, S. J. & Wilcots, E. M. 2004, AJ, 128, 2789

Buta, R. 1987, ApJS, 64, 1

Buta, R. 1995, ApJS, 96, 39

Buta, R. & Block, D. L. 2001, ApJ, 550, 243

Buta, R. & Combes, F. 1996, Fund. Cosmic Phys. 17, 95

Buta R. & Crocker D. A. 1993, AJ, 106, 939

Buta, R., Byrd, 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 U. Press (dVA)

Buta, R. J., Knapen, J. K., Elmegreen, B. G., Salo, H., Laurikainen, E., Elmegreen, D. M., Puerari, I., & Block, D. L. 2009, AJ, 137, 4487

Buta, R. et al. 2010a, ApJS, 190, 147

Buta, R., Laurikainen, E., Salo, H., & Knapen, J. H. 2010b, ApJ, 721, 259

Buta, R., Mitra, S., de Vaucouleurs, G., & Corwin, H. G. 1994, AJ, 107, 118

Buta, R., Laurikainen, E., Salo, H., Block, D. L., & Knapen, J. H. 2006, AJ, 132, 1859

Buta, R. & Zhang, X, 2009, ApJS, 182, 559

Butcher, H. & Oemler, A. 1978, ApJ, 219, 18

Byrd, G. G., Rautiainen, P. Salo, H., Buta, R., & Crocker, D. A. 1994, AJ, 108, 476

Caon, N., Capaccioli, M., & D’Onofrio, M. 1993, MNRAS, 265, 1013

- Cappellari, M. et al. 2011, astro-ph 1012.1551
- Cardemone, C. et al. 2009, MNRAS, 399, 1191
- Carignan, C. & Purton, C. 1998, ApJ, 506, 125
- Carollo, C. M., Stiavelli, M., de Zeeuw, P. T., & Mack, J. 1997, AJ, 114, 2366
- Cayatte, V., Kotanyi, C., Balkowski, C., & van Gorkom, J. H. 1994, AJ, 107, 1003
- Chapman, S. C., Windhorst, R., Odewahn, S., et al. 2003, ApJ, 599, 92
- Chung, A., van Gorkom, J. H., Kenney, J. D. P., Cowl, Hugh, & Vollmer, B. 2009, AJ, 138, 1741
- Cole, A. A. et al. 2007, ApJ, 659, L17
- Comerón, S., Knapen, J. H., Beckman, J. E., Laurikainen, E., Salo, H., Martinez-Valpuesta, I., & Buta, R. J. 2010, MNRAS, 402, 2462
- Comerón, S., Martinez-Valpuesta, I., Knapen, J. H., & Beckman, J. 2009, ApJ, 706, L25
- Conselice, C. J. 1997, PASP, 109, 1251
- Conselice, C. J. 2003, ApJS, 147, 1
- Conselice, C. J. et al. 2004, ApJ, 600, L139
- Conselice, C. J., Rajgor, S., & Myers, R. 2008, MNRAS, 386, 909
- Conselice, C. J. 2009, MNRAS, 399, L16
- Conselice, C. J. & Arnold, J. 2009, MNRAS, 397, 208
- Contopoulos, G. 1996, ASP Conf. Ser. 91, p. 454
- Contopoulos, G. & Grosbol, P. 1989, Astr. Astrophys. Rev. 1, 261

- Cowie, L., Hu, E., & Songaila, A. 1995, *AJ*, 110, 1576
- Crocker, D. A., Baugus, P. D., & Buta, R. 1996, *ApJS*, 105, 353
- Cullen, H., Alexander, P., Green, D. A., & Sheth, K. 2007, *MNRAS*, 376, 98
- Darg, D. W. et al. 2010, *MNRAS*, 401, 1043
- Davies, R. L., Efstathiou, G., Fall, S. M., Illingworth, G., & Schechter, P. L. 1983, *ApJ*, 266, 41
- de Vaucouleurs, G. 1956, *Mem. Comm. Obs.*, 3, No. 13
- de Vaucouleurs, G. 1958, *ApJ*, 127, 487
- de Vaucouleurs, G. 1959, *Handbuch der Physik*, 53, 275
- de Vaucouleurs, G. 1961, *ApJS*, 5, 233
- de Vaucouleurs, G. 1963, *ApJS*, 8, 31
- de Vaucouleurs, G. & Freeman, K. C. 1972, *Vistas in Astronomy* 14, 163
- de Vaucouleurs, G. de Vaucouleurs, A., & Corwin, H. G. (1976), *Second Reference Catalogue of Bright Galaxies*, Univ. Texas Mono. Astr. No. 2 (RC2)
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, H. G., Buta, R., Paturel, G., & Fouque, P. 1991, *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies*, New York, Springer (RC3)
- de Zeeuw, P. T. et al. 2002, *MNRAS*, 329, 513
- Djorgovski, S. 1992, in *Morphological and Physical Classification of Galaxies*, G. Longo, M. Capaccioli, & G. Busarello, eds., Dordrecht, Kluwer, p. 337
- Dressler, A. 1980, *ApJ*, 236, 351
- Durbala, A., Buta, R., Sulentic, J. W., & Verdes-Montenegro, L. 2009, *MNRAS*, 397, 1756

- Durbala, A., Sulentic, J. W., Buta, R., & Verdes=Montenegro, L. 2008, MNRAS, 390, 881
- Elmegreen, D. M. 1981, ApJS, 47, 229
- Elmegreen, D. M. & Elmegreen, B. G. 1987, ApJ, 314, 3
- Elmegreen, D. & Elmegreen, B. G. 2006, ApJ, 651, 676 (EE06)
- Elmegreen, D., Elmegreen, B. G., & Sheets, C. 2004, ApJ, 603, 74 (EES04)
- Elmegreen, D., Elmegreen, B. G., & Ferguson, T. E. 2005, ApJ, 623, L71
- Elmegreen, D., Elmegreen, B. G., Ferguson, T. E., & Mullan, B. 2007a, ApJ, 663, 734 (EEFM07)
- Elmegreen, D. M., Elmegreen, B. G., Ravindranath, S., & Coe, D. A. 2007b, ApJ, 658, 763
- Elmegreen, D., Elmegreen, B. G., & Hirst, A. 2004, ApJ, 604, L21 (EEH04)
- Elmegreen, D. M., Elmegreen, B. G., Marcus, M. T., Shainyan, K., Yau, A., & Petersen, M. 2009b, ApJ, 701, 306
- Elmegreen, B. G., Bournaud, F., & Elmegreen, D. M. 2008, ApJ, 688, 67
- Elmegreen, B. G., Elmegreen, D. M., & Leitner, S. N. 2003, ApJ, 590, 271 (EEL03)
- Elmegreen, B. G., Elmegreen, D. M., & Montenegro, L. 1992, ApJS, 79, 37
- Elmegreen, B. G., Elmegreen, D. M., Fernandez, M. X., & Lemonias, J. J. 2009a, ApJ, 692, 12
- Emsellem, E. et al. 2007, MNRAS, 379, 401
- Eskridge, P. B. et al. 2000, AJ, 119, 536
- Eskridge, P. B. et al. 2002, ApJS, 143, 73

- Fazio, G. G. et al. 2004, ApJS, 154, 10
- Ferguson, H. C. & Binggeli, B. 1994, Astr. Ap. Rev. 6, 67
- Ferrarese, L. et al. 2006, ApJS, 164, 334
- Freeman, K. C. 1975, in Galaxies and the Universe, A. Sandage, M. Sandage, & J. Kristian, eds., Chicao, University of Chicago Press, p. 409
- Garcia-Ruiz, I., Sancisi, R., & Kuijken, K. 2002, A&A, 394, 769
- Giavalisco, M. et al. 2004, ApJ, 600, L93
- Gil de Paz, A., Madore, B. F., & Pevunova, O. 2003, ApJS, 147, 29
- Gil de Paz, A. et al. 2005, ApJ, 627, L29
- Gillett, F. C., Forrest, W. J., & Merrill, K. M. 1973, ApJ, 183, 87
- Giovanelli, R. & Haynes, M. P. 1985, AJ, 292, 404
- Graham, A. W. & Guzmán, R. 2003, AJ, 125, 2936
- Grouchy, R. D., Buta, R., Salo, H., Laurikainen, E., & Speltincx, T. 2008, AJ, 136, 980
- Grouchy, R. D., Buta, R. J., Salo, H., & Laurikainen, E. 2010, AJ, 139, 2465
- Gunn, J. E. & Gott, J. R. 1972, ApJ, 176, 1
- Gunn, J. E. et al. 1998, AJ, 116, 3040
- Helfer, T. T., Thornley, M. D., Regan, M. W., Wong, T., Sheth, K., Vogel, S. N., Blitz, L., & Bock, D. C.-J. 2003, ApJS, 145, 259
- Helou, G. et al. 2004, ApJS, 154, 253
- Higdon, J. L. 1995, ApJ, 455, 524

- Higdon, J. L., Buta, R. J., & Purcell, G. B. 1998, *AJ*, 115, 80
- Holmberg, E. 1950, *Medd. Lunds. Astron. Obs., Ser. II*, No. 128
- Holwerda, B. W., Keel, W. C., Williams, B., Dalcanton, J. J., & de Jong, R. S. 2009, *AJ*, 137, 3000
- Hubble, E. 1926, *ApJ*, 64, 321
- Hubble, E. 1936, *The Realm of the Nebulae*, Yale Univ. Press, Yale.
- Hubble, E. 1943, *ApJ*, 97, 112
- Hunt, L. K. & Malkan, M. A. 1999, *ApJ*, 516, 660
- Hunter, D. A. 1997, *PASP*, 109, 937
- Impey, C. & Bothun, G. D. 1997, *ARA&A*, 35, 267
- Irwin, M. J. et al. 2007, *ApJ*, 656, L13
- Jarrett, T. H. et al. 2003, *AJ*, 125, 525
- Jeans, J. 1929, *Astronomy and Cosmogony*, Cambridge, Cambridge University press
- Jerjen, H., Kalnajs, A., & Binggeli, B. 2000, *A&A*, 358, 845
- Jogee, S. et al. 2009, *ApJ*, 697, 1971
- Jokimaki, A., Orr, H., & Russell, D. G. 2008, *AP&SS*, 315, 249
- Karachentseva, V. E. 1973, *Astrofiz. Issled-Izv. Spets. Astrofiz. Obs.* 8, 3
- Karataeva, G. M., Tikhonov, N. A., Galazutdinova, O. A., Hagen-Thorn, V. A., & Yakovleva, V. A. 2004, *A&A*, 421, 833
- Kennicutt, R. C., Tamblin, P., & Congdon, C. W. 1994, *ApJ*, 435, 22

- Kerr, F. & de Vaucouleurs, G. 1955, *Australian Journal of Physics*, 8, 508
- Knapen, J. H. 2005, *A&A*, 429, 141
- Knapen, J., Beckman, J. E., Shlosman, I., Peletier, R. F., Heller, C. H., & de Jong, R. S. 1995a, *ApJ*, 443, L73
- Knapen, J., Beckman, J. E., Heller, C. H., Shlosman, I., & de Jong, R. S. 1995b, *ApJ*, 454, 623
- Knapen, J. H., Shlosman, I., & Peletier, R. F. 2000, *ApJ*, 529, 93
- Knapen, J. H. 2010, in *Galaxies and Their Masks*, D. L. Block, K. C. Freeman, & I. Puerari, eds., New York, Springer, in press
- Knapen, J. H. & James, P. A. 2009, *ApJ*, 698, 1437
- Koopmann, R. & Kenney, J. D. P. 2004, *ApJ*, 613, 866
- Kormendy, J. 1979, *ApJ*, 227, 714
- Kormendy, J. 1985, *ApJ*, 295, 73
- Kormendy, J. 1999, *ASPC*, 182, 124
- Kormendy, J. & Bender, R. 1996, *ApJ*, 464, L119
- Kormendy, J. & Djorgovski, S. 1989, *ARA&A*, 27, 235
- Kormendy, J. & Kennicutt, R. C. 2004, *ARA&A*, 42, 603 (KK04)
- Kormendy, J. & Norman, C. A. 1979, *ApJ*, 233, 539
- Kormendy, J., Fisher, D. B., Cornell, M. E., & Bender, R. 2009, *ApJS*, 182, 216
- Kuijken, K. & Merrifield, M. R. 1995, *ApJ*, 443, L13

- Laine, S., Shlosman, I., Knapen, J., & Peletier, R. F. 2002, *ApJ*, 567, 97
- Laurikainen, E. & Salo, H. 2002, *MNRAS*, 337, 1118
- Laurikainen, E., Salo, H., & Buta, R. 2004, *ApJ*, 607, 103
- Laurikainen, E., Salo, H., & Buta, R. 2005, *MNRAS*, 362, 1319
- Laurikainen, E., Salo, H., Buta, R., Knapen, J., Speltincx, T., & Block, D. L. 2006, *MNRAS*, 132, 2634
- Laurikainen, E., Salo, H., Buta, R., & Knapen, J. 2007, *MNRAS*, 381, 401
- Laurikainen, E., Salo, H., Buta, R., & Knapen, J. 2009, *ApJ*, 692, L34
- Laurikainen, E., Salo, H., Buta, R., Knapen, J. H., & Comerón, S. 2010, *MNRAS*, 405, 1089
- Lelli, F., Fraternali, F., & Sancisi, R. 2010, *A&A*, 516, 11
- Lintott, C. et al. 2008, *MNRAS*, 389, 1179
- Lintott, C. et al. 2009, *MNRAS*, 399, 129
- Lisker, T., Debattista, V. P., Ferreras, I., & Erwin, P. 2006, *MNRAS*, 370, 477
- Lotz, J. M., Madau, P., Giavalisco, M., Primack, J., & Ferguson, H. C. 2006, *ApJ*, 636, 592
- Lupton, R., Blanton, M. R., Fekete, G., Hogg, D. W., O’Mullane, W., Szalay, A., & Wherry, N. 2004, *PASP*, 116, 133
- Lynden-Bell, D. & Kalnajs, A. J. 1972, *MNRAS*, 157, 1
- Madore, B. F., Nelson, E., & Petrillo, K. 2009, *ApJS*, 181, 572
- Malin, D. F. & Carter, D. 1980, *Nature*, 285, 643
- Malin, D. F. & Carter, D. 1983, *ApJ*, 274, 534

- Martin, D. C. et al. 2005, *ApJ*, 619, L1
- Martin, D. C. et al. 2007, *ApJS*, 173, 342
- Martin, P. & Friedli, D. 1997, *A&A*, 326, 449
- Martinez-Valpuesta, I., Shlosman, I., & Heller, C. 2006, *ApJ*, 637, 214
- Martinez-Valpuesta, I., Knapen, J. H., & Buta, R. 2007, *AJ*, 134, 1863
- Masters, K. L. et al. 2010, *MNRAS*, 405, 783
- Mateo, M. 1998, *ARA&A*, 36, 435
- Matthews, T. A., Morgan, W. W., & Schmidt, M. 1964, *ApJ*, 140, 35
- Mazzuca, L. M., Swaters, R. A., Veilleux, S., & Knapen, J. H. 2009, *BAAS*, 41, 693
- McGaugh, S., Schombert, J. M., & Bothun, G. D. 1995, *AJ*, 109, 2019
- McKernan, B., Ford, K. E. S., & Reynolds, C. S. 2010, *astro-ph* 1005.4907
- Menanteau, F., Abraham, R. G., & Ellis, R. S. 2001, *MNRAS*, 322, 1
- Menanteau, F. et al. 2004, *ApJ*, 612, 202
- Meurer, G. R., Carignan, C., Beaulieu, S. F., & Freeman, K. C. 1996, *AJ*, 111, 1551
- Moore, B., Katz, N., Lake, G., Dressler, A., & Oemler, A. 1996, *Nature*, 379, 613
- Morgan, W. W. 1958, *PASP*, 70, 364
- Nair, P. B. & Abraham, R. G. 2010, *ApJS*, 186, 427
- Odewahn, S. C. 1991, *AJ*, 101, 829
- Odewahn, S. C., Stockwell, E. B., Pennington, R. L., Humphreys, R. M., & Zumach, W. A. 1992, *AJ*, 103, 318

- Oosterloo, T. A., Morganti, R., Sadler, E. M., Vergani, D., & Caldwell, N. 2002, *AJ*, 123, 729
- Pahre, M., Ashby, M. L. N., Fazio, G. G., & Willner, S. P. 2004, *ApJS*, 154, 235
- Pence, W. D., Taylor, K., Freeman, K. C., de Vaucouleurs, G., & Atherton, P. 1988, *ApJ*, 326, 564
- Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., & Rix, H-W. 2010, *AJ*, 139, 2097
- Pereira-Santaella, M., Alonso-Herrero, A., Rieke, G. H., Colina, L. Díaz-Santos, T., Smith, J.-D. T., Pérez-González, P. G., & Engelbracht, C. W. 2010, *ApJS*, 188, 447
- Quillen, A. C., Frogel, J. A., & González, R. A. 1994, *ApJ*, 437, 162
- Rahman, N., Howell, J. H., Helou, G., Mazzarella, J. M., & Buckalew, B. 2007, *ApJ*, 663, 908
- Rautiainen, P. & Salo, H. 2000, *A&A*, 362, 465
- Rautiainen, P., Salo, H., & Buta, R. 2004, *MNRAS*, 349, 933
- Ravindranath, S. et al. 2006, *ApJ*, 652, 963
- Regan, M. & Teuben, P. 2003, *ApJ*, 582, 723
- Regan, M. & Teuben, P. 2004, *ApJ*, 600, 595
- Regan, M. W., Thornley, M. D., Helfer, T. T.; Sheth, K., Wong, T., Vogel, S. N., Blitz, L., & Bock, D. C.-J. 2001, *ApJ*, 561, 218
- Regan, M. et al. 2004, *ApJS*, 154, 204
- Reynolds, J. H. 1927, *Observatory*, 50, 185
- Revaz, Y. & Pfenniger, D. 2007, in *Island Universes, Astrophysics & Space Science*

Proceedings, p. 149

Rieke, G. H. & Low, F. J. 1972, ApJ, 176, L95

Rix, H.-W. & Rieke, M. J. 1993, ApJ, 418, 123

Rix, H.-W. et al. 2004, ApJS, 152, 163

Romano, R., Mayya, Y. D., & Vorobyov, E. I. 2008, AJ, 136, 1259

Romero-Gómez, M., Masdemont, J. J., Athanassoula, E., & García-Gómez, C. 2006, A&A, 453, 39

Romero-Gómez, M., Athanassoul, E., Masdemont, J. J., & García-Gómez, C. 2007, A&A, 472, 63

Ryder, S. D., Buta, R. J., Toledo, H., Shukla, H. Staveley-Smith, L., & Walsh, W. 1996, ApJ, 460, 665

Sackett, P. D., Rix, H.-W., Jarvis, B. J., & Freeman, K. C. 1994, ApJ, 436, 629

Saha, K., de Jong, R., & Holwerda, B. 2009, MNRAS, 396, 409

Salo, H. & Laurikainen, E. 2000a, MNRAS, 319, 377

Salo, H. & Laurikainen, E. 2000b, MNRAS, 319, 393

Salo, H., Laurikainen, E., Buta, R., & Knapen, J. H. 2010, ApJ, 715, L56

Sandage, A. 1961, The Hubble Atlas of Galaxies, Carnegie Inst. of Wash. Publ. No. 618

Sandage, A. 1975, in *Galaxies and the Universe, Stars and Stellar Systems, Vol. IX*, A.

Sandage, M. Sandage, & J. Kristian, eds., p. 1.

Sandage, A. & Bedke, J. 1994, The Carnegie Atlas of Galaxies, Carnegie Inst. of Wash. Pub. No. 638

- Sandage, A. & Binggeli, B. 1984, *AJ*, 89, 919
- Sandage, A. & Tammann, G. A. 1981, *A Revised Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies*, Carnegie Institute of Washington Publ. No. 635 (first edition) (RSA)
- Sanders, D. B. & Mirabel, I. F. 1996, *ARA&A*, 34, 749
- Schawinski, K., Thomas, D., Sarzi, M., Maraston, C., Kaviraj, S., Joo, S., Yi, S. K., & Silk, J. 2007, *MNRAS*, 382, 1415
- Schombert, J. 1986, *ApJS*, 60, 603
- Schombert, J. 1987, *ApJS*, 64, 643
- Schombert, J. 1988, *ApJ*, 328, 475
- Schombert, J., Pildis, R. A., Eder, J. A., & Oemler, A. 1995, *AJ*, 110, 2067
- Schwarz, M. P. 1981, *ApJ*, 247, 77
- Schwarz, M. P. 1984, *MNRAS*, 209, 93
- Schweizer, F. 1998, in *Galaxies: Interactions and Induced Star Formation*, R. C. Kennicutt, et al., eds., Berlin, Springer, p. 105
- Schweizer, F. & Seitzer, P. 1988, *ApJ*, 328, 88
- Schweizer, F., Ford, W. K., Jedrzejewski, R., & Giovanelli, R. 1987, *ApJ*, 320, 454
- Schweizer, F., van Gorkom, J., & Seitzer, P. 1989, *ApJ*, 338, 770
- Scoville, N. et al. 2007, *ApJS*, 172, 38
- Seiden, P. E. & Gerola, H. 1982, *Fund. Cosmic Phys.* 7, 241
- Seigar, M. S., Block, D. L., Puerari, I., Chorney, N. E., & James, P. A. 2005, *MNRAS*, 359, 1065

- Seigar, M. S., Kennefick, D., Kennefick, J., & Lacy, C. H. 2008, *ApJ*, 678, L93
- Sellwood, J. A. 2010, in *Planets, Stars, and Stellar Systems*, Vol. 5, in production
- Sellwood, J. A. & Wilkinson, A. 1993, *Reports on Progress in Physics*, 56, 173
- Shamir, L. 2009, *MNRAS*, 399, 1367
- Sheth, K. et al. 2008, *ApJ*, 675, 1141
- Sheth, K. et al. 2010, *PASP*, 122, 1397
- Sil’chenko, O. K. & Afanasiev, V. L. 2004, *AJ*, 127, 2641
- Simkin, S. M., Su, H. J., & Schwarz, M. P. 1980, *ApJ*, 237, 404
- Skrutskie, M. F. et al. 2006, *AJ*, 131, 1163
- Sparke, L. S., van Moorsel, G., Erwin, P., & Wehner, E. M. H. 2008, *AJ*, 135, 99
- Spitzer, L. & Baade, W. 1951, *ApJ*, 113, 413
- Steidel, C. & Hamilton, D. 1992, *AJ*, 104, 941
- Steidel, C., Giavalisco, M., Dickinson, M., & Adelberger, K. 1996, *AJ*, 112, 352
- Strateva, I. et al. 2001, *AJ*, 122, 1861
- Struck, C. 2010, *MNRAS*, 403, 1516
- Struck, C., Appleton, P. N., Borne, K. D., & Lucas, R. A. 1996, *AJ*, 112, 1868
- Sulentic, J. et al. 2006, *A&A*, 449, 937
- Surace, J. A., Sanders, D. B., Vacca, W. D., Veilleux, S., & Mazzarella, J. M. 1998, *ApJ*, 492, 116
- Taniguchi, Y. & Watanabe, M. 1987, *ApJ*, 313, 89

- Taylor-Mager, V. A., Conselice, C. J., Windhorst, R. A., & Jansen, R. A. 2007, *ApJ*, 659, 162
- Theis, C., Sparke, L., & Gallagher, J. 2006, *A&A*, 446, 905
- Theys, J. C. & Spiegel, J. C. 1976, *ApJ*, 208, 650
- Thilker, D. A. et al. 2010, *ApJ*, 714, L171
- Thornley, M. 1996, *ApJ*, 469, 45
- Thuan, T. X. & Martin, G. E. 1981, *ApJ*, 247, 823
- Thuan, T. X., Izotov, Y. I., Lipovetsky, V. A. 1997, *ApJ*, 477, 661
- Tolstoy, E., Hill, V., & Tosi, M. 2009, *ARA&A*, 47, 371
- Treuthardt, P., Salo, H., Rautinainen, P., & Buta, R. 2008, *AJ*, 136, 300
- Vaisanen, P., Ryder, S., Mattila, S., & Kotilainen, J. 2008, *ApJ*, 689, L37
- van den Bergh, S. 1980a, *PASP*, 92, 122
- van den Bergh, S. 1980b, *PASP*, 92, 409
- van den Bergh, S. 1995, *AJ*, 110, 613
- van den Bergh, S. 1998, *Galaxy Morphology and Classification*, Cambridge, Cambridge University Press
- van den Bergh, S. 2009a, *ApJ*, 694, L120
- van den Bergh, S. 2009b, *ApJ*, 702, 1502
- van den Bergh, S., Abraham, R. G., Ellis, R. S., Tanvir, N. R., Santiago, B. X., & Glazebrook, K. G 1996, *AJ*, 112, 359

- van den Bergh, S., Cohen, J. G., Hogg, D. W., & Blandford, R. 2000, *AJ*, 120, 2190
- van den Bergh, S., Pierce, M., & Tully, R. B. 1990, *ApJ*, 359, 4
- van der Wel, A., Bell, E. F., Holden, B. P., Skibba, R. A., & Rix, H.-W. 2010, *ApJ*, 714, 1779
- van Driel, W. et al. 1995, *AJ*, 109, 942
- Vanzi, L. & Sauvage, M. 2004, *A&A*, 415, 509
- Verdes-Montenegro, L., Sulentic, J., Lisenfeld, U., Leon, S., Espada, D., Garcia, E., Sabater, J., & Verley, S. 2005, *A&A*, 436, 443
- Veron-Cetty, M. & Veron, P. 2006, *A&A*, 455, 773
- Volonteri, M., Saracco, P., Chincarini, G., & Bolzonella, M. 2000, *A&A*, 362, 487
- Walter, F., Brinks, E., de Blok, W. J. G., Bigiel, F., Kennicutt, R. C., Thornley, M. D., & Leroy, A. 2008, *AJ*, 136, 2563
- White, R. E. & Keel, W. C. 1992, *Nature*, 359, 129
- Whitmore, B. C., Lucas, R. A., McElroy, D. B., Steiman-Cameron, T. Y., Sackett, P. D., & Olling, R. P. 1990, *AJ*, 100, 1489
- Williams, R. E. et al. 1996, *ApJ*, 112, 1335
- Willman, B. et al. 2005, *ApJ*, 626, L85
- Willner, S. et al. 2004, *ApJS*, 154, 222
- Windhorst, R. et al. 2010, *ApJS*, May, 2010, in press
- Wirth, A. & Gallagher, J. S. 1984, *ApJ*, 282, 85
- Wyder, T. K. et al. 2007, *ApJS*, 173, 293

Yagi, M., Yoshida, M., Komiyama, Y., Kashikawa, N.; Furusawa, H., Okamura, S., Graham, A. W.; Miller, N. A.; Carter, D., Mobasher, B., & Jogee, S. 2010, AJ, 140, 1814

York, D. G. et al. 2000, AJ, 120, 1579

Zhang, X. 1996, ApJ, 457, 125

Zhang, X. 1998, ApJ, 499, 93

Zhang, X. 1999, ApJ, 518, 613

Zhang, X. & Buta, R. 2007, AJ, 133, 2584

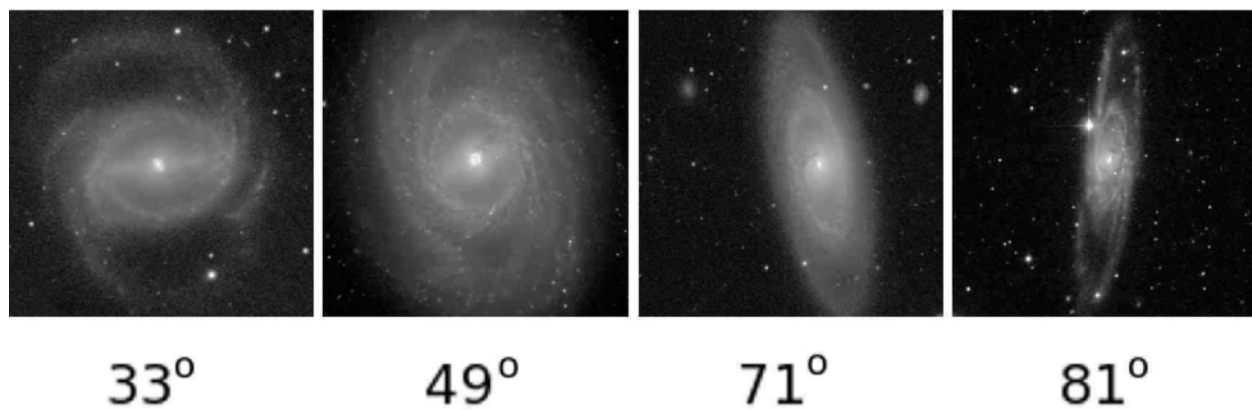


Fig. 1.— Four galaxies of likely similar face-on morphology viewed at different inclinations (number below each image). The galaxies are (left to right): NGC 1433, NGC 3351, NGC 4274, and NGC 5792. Images are from the dVA (filters B and g).

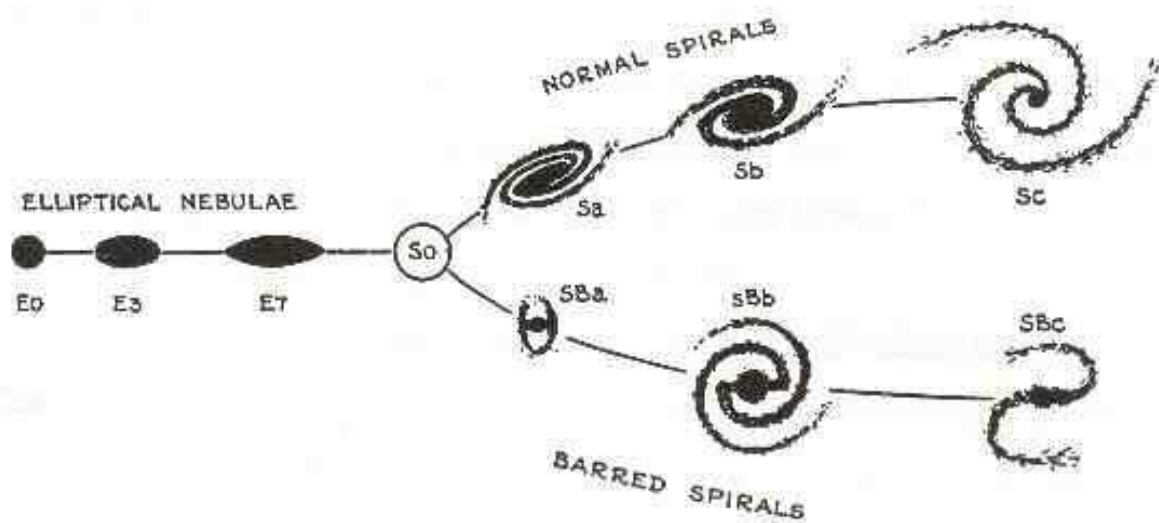


Fig. 2.— Hubble's (1936) "tuning fork" of galaxy morphologies is the basis for modern galaxy classification.

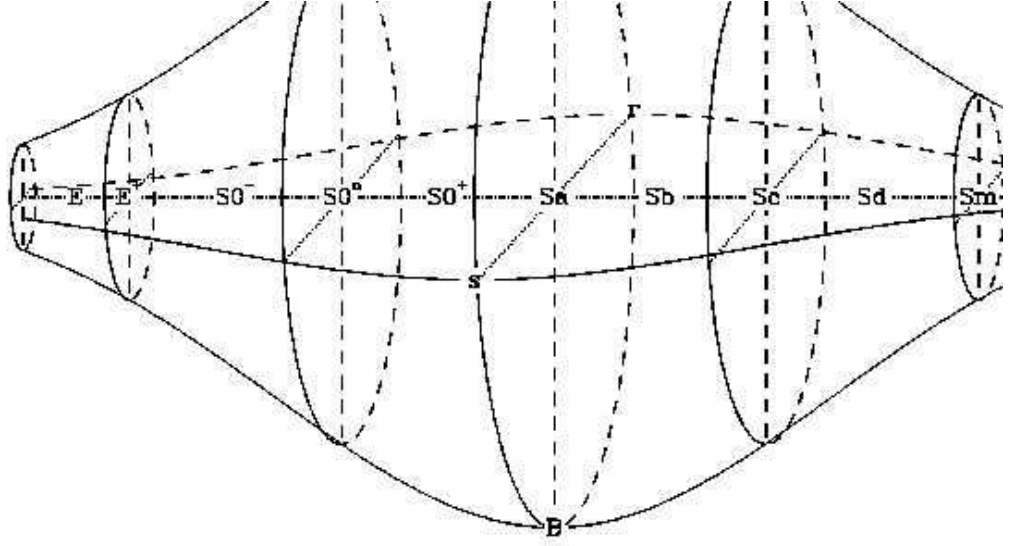


Fig. 3.— de Vaucouleurs’s (1959) classification volume, a revision and extension of the Hubble tuning fork. The three dimensions are the stage (Hubble type), the family (apparent bar strength), and the variety (presence or absence of an inner ring).

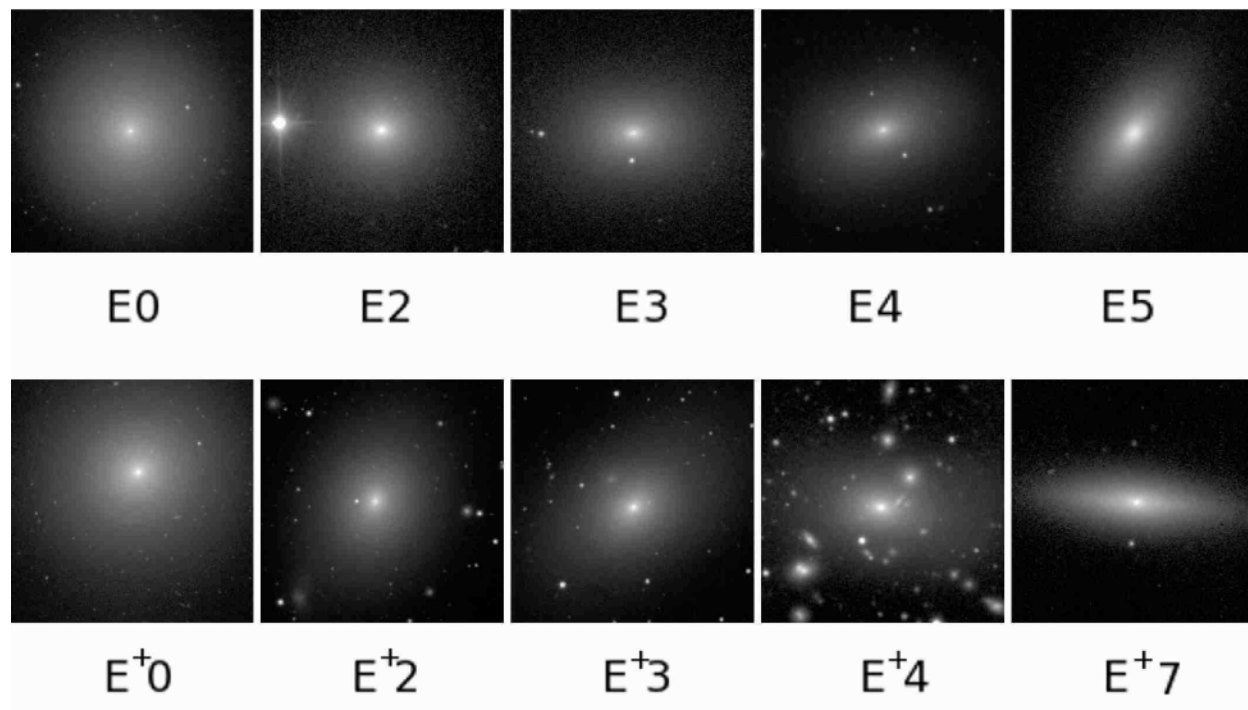


Fig. 4.— Examples of elliptical galaxies of different projected shapes. Type E galaxies are normal ellipticals with no structural details. From left to right the galaxies shown are NGC 1379, 3193, 5322, 1426, and 720. Type E⁺ galaxies are “late” ellipticals, which may include faint extended envelopes typical of large cluster ellipticals, or simple transition types to S0[−]. The examples shown are (left to right): NGC 1374, 4472, 4406, 4889, and 4623. All of these images are from the dVA (filters *B*, *V*, and *g*).

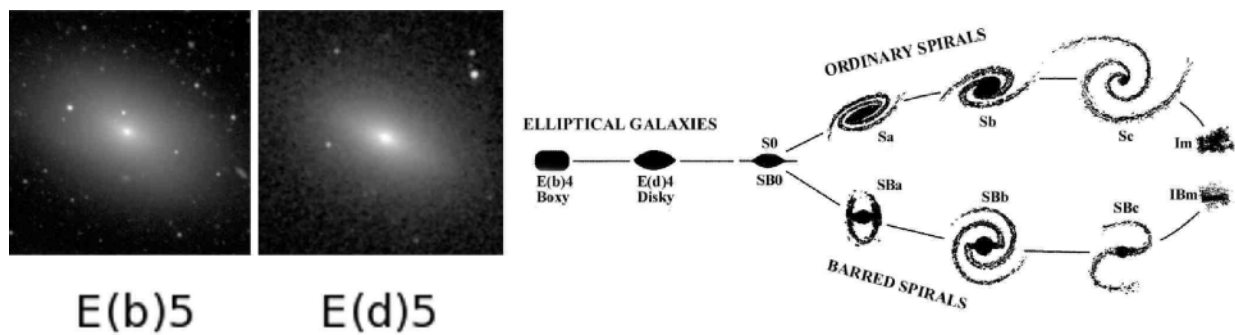


Fig. 5.— Revised classification of elliptical galaxies from Kormendy & Bender (1996), as schematically incorporated into Hubble’s (1936) “tuning fork.” At left are two examples of boxy and diskly ellipticals: NGC 7029 (left, B -band) and NGC 4697 (JHK_s composite, 2MASS image from NED).

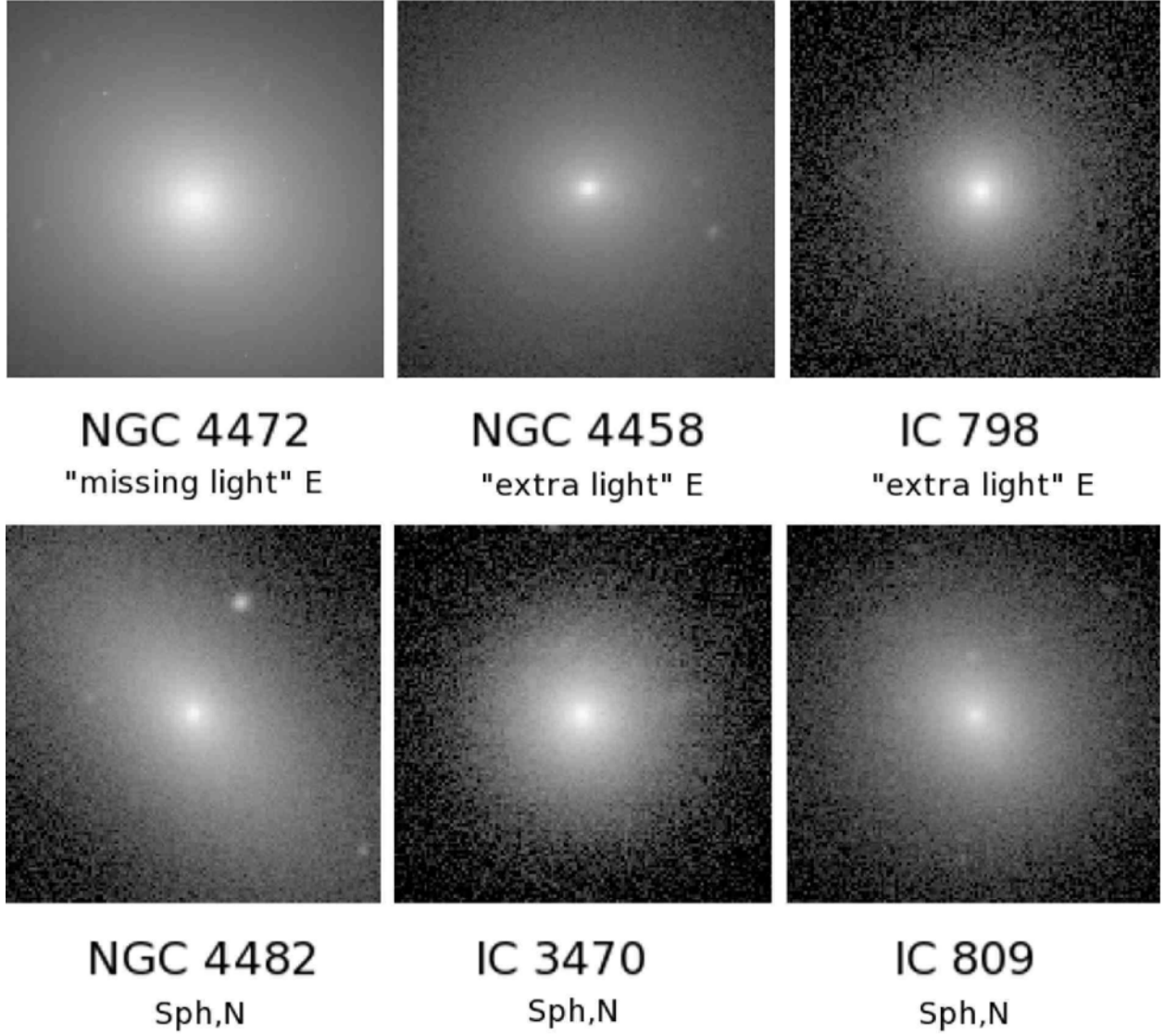


Fig. 6.— Illustrations of 6 early-type galaxies in the Virgo Cluster with photometric classifications from Kormendy et al. (2009): NGC 4472 (core E, $M_V = -23.2$); NGC 4458 (coreless E, $M_V = -19.0$); IC 798 (VCC 1440; ‘coreless E, $M_V = -16.9$); NGC 4482 (nucleated spheroidal, $M_V = -18.4$); IC 3470 (VCC 1431; nucleated spheroidal, $M_V = -17.4$); IC 809 (VCC 1910; nucleated spheroidal, $M_V = -17.4$). The images shown are all based on SDSS g -band single or mosaic images, and are in units of mag arcsec^{-2} .

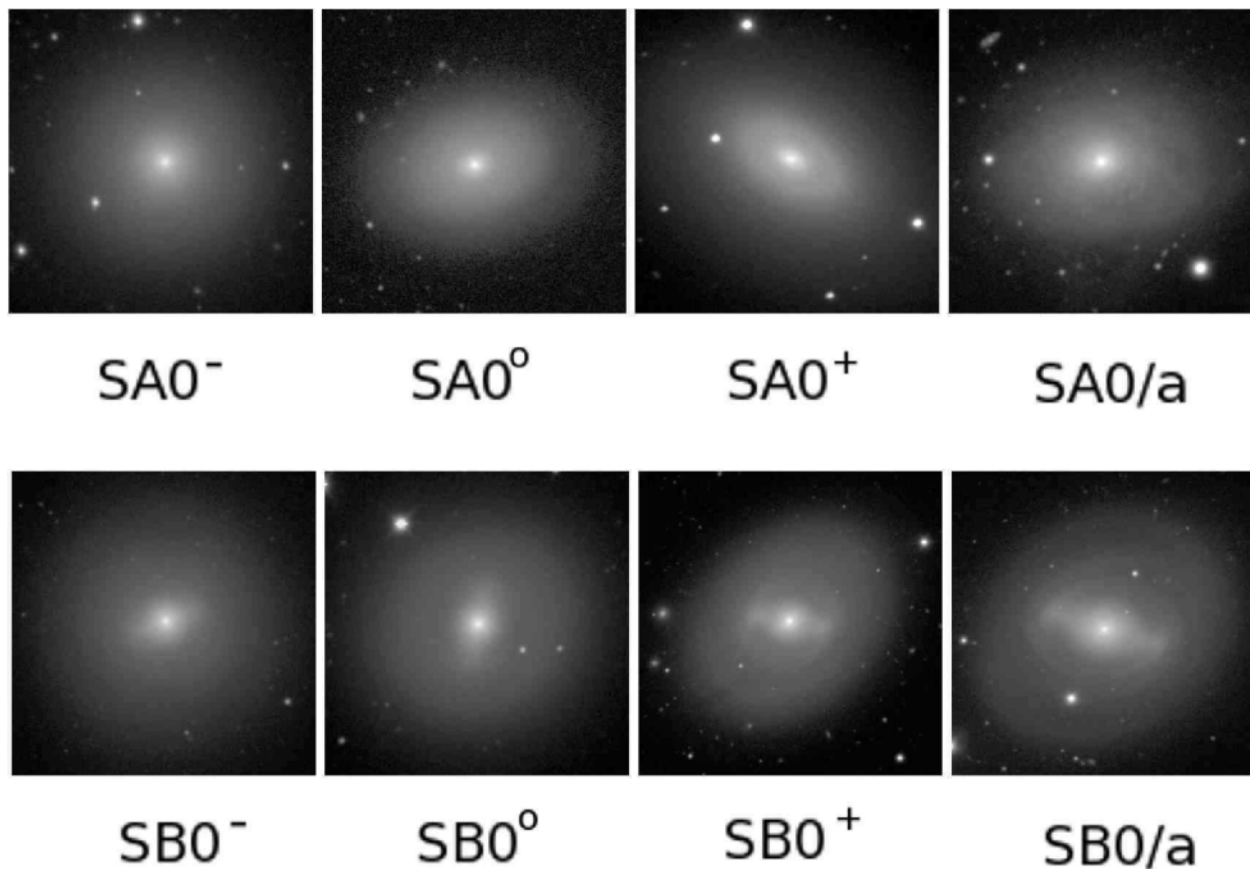


Fig. 7.— Examples of barred and nonbarred S0 galaxies of different stages from “early” (S0⁻), to “intermediate” (S0⁰), to “late” (S0⁺), including the transition stage to spirals, S0/a. The galaxies shown are (left to right): Row 1 - NGC 7192, 1411, 1553, and 7377; Row 2 - NGC 1387, 1533, 936, and 4596. All images are from the dVA (filters *B* and *V*).

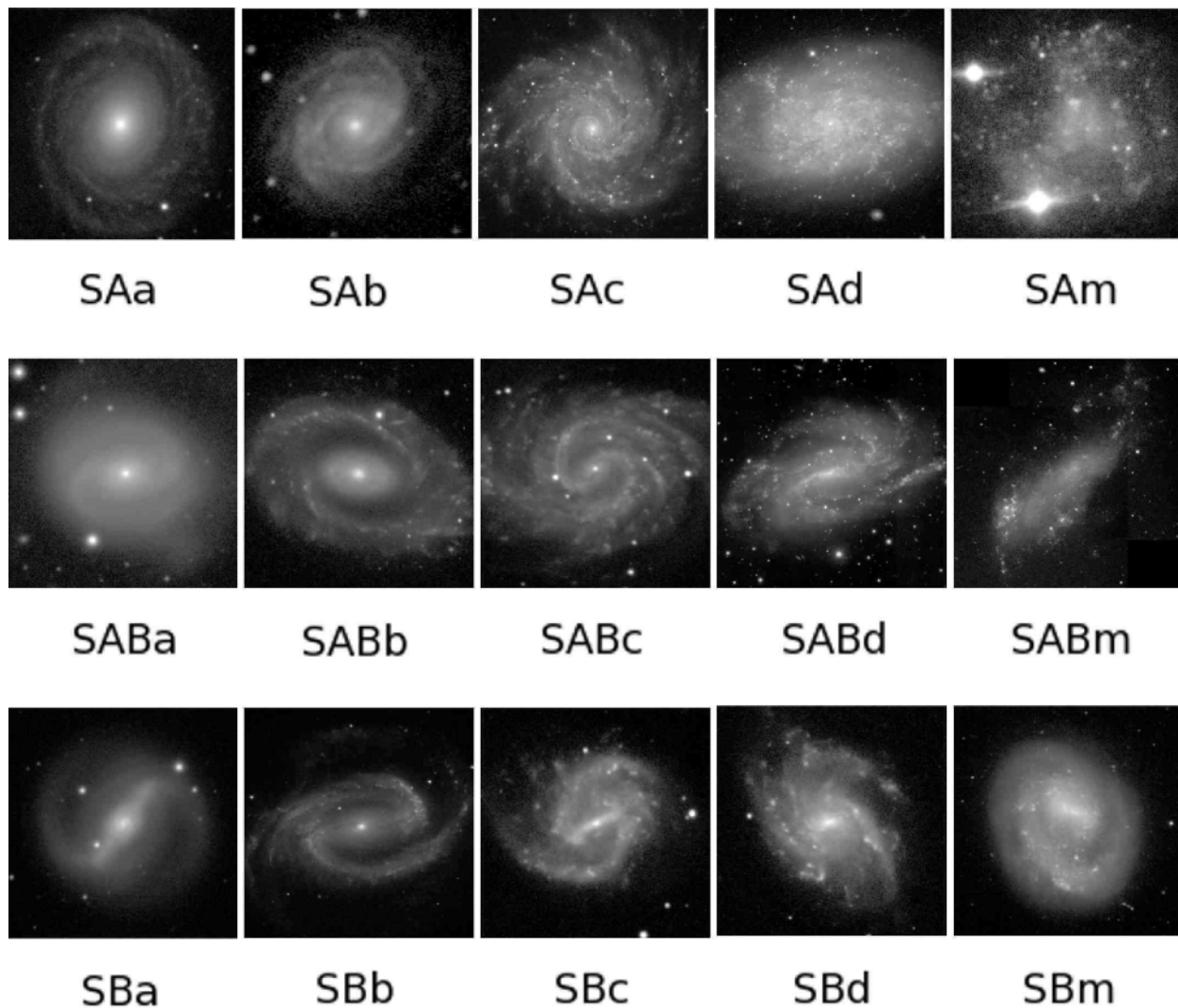


Fig. 8.— Stage classifications for spirals, divided according to bar classifications into parallel sequences. The galaxies illustrated are (left to right): Row 1 - NGC 4378, 7042, 628, 7793, and IC 4182; Row 2 - NGC 7743, 210, 4535, 925, and IC 2574; Row 3 - NGC 4314, 1300, 3513, 4519, and 4618. All images are *B*-band from the dVA.

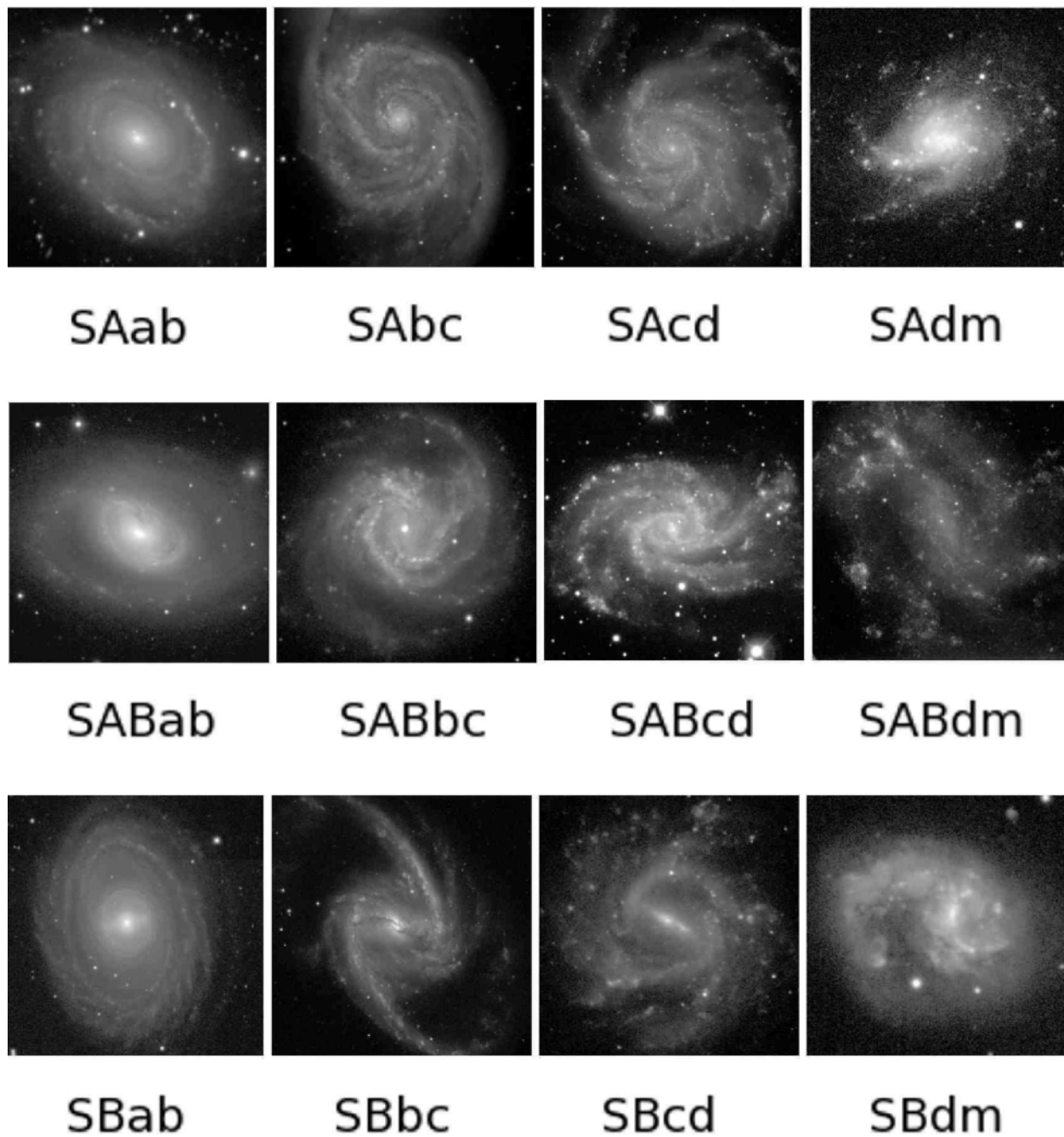


Fig. 9.— Sequences of stages intermediate between the main stages illustrated in Figure 8. The galaxies are (left to right): Row 1 - NGC 2196, 5194, 5457, and 4534; Row 2 - NGC 3368, 4303, 2835, and 4395; Row 3 - NGC 1398, 1365, 1073, and 4027. All images are *B*-band from the dVA, except for NGC 4534, which is SDSS *g*-band.

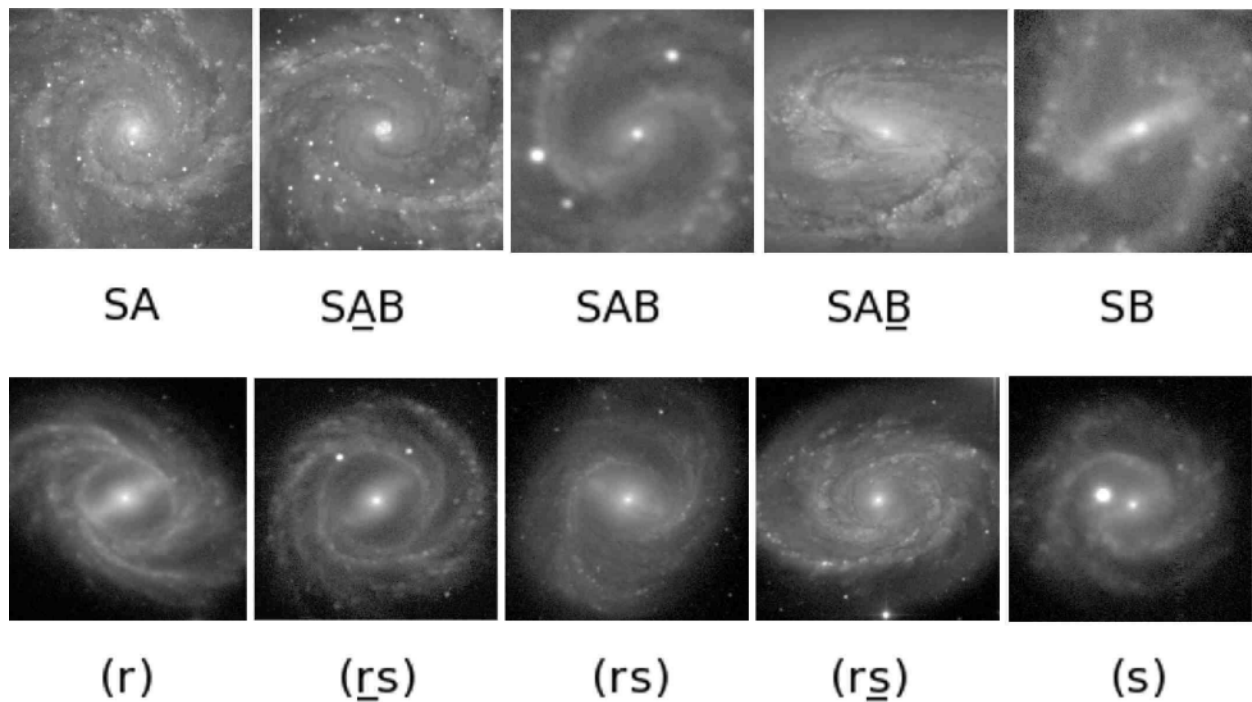


Fig. 10.— The continuity of family and variety characteristics among spiral galaxies, including underline classifications used by de Vaucouleurs (1963). The galaxies are (left to right): Row 1 - NGC 628, 2997, 4535, 3627, and 3513; Row 2 - NGC 2523, 3450, 4548, 5371, and 3507. All images are *B*-band from the dVA.

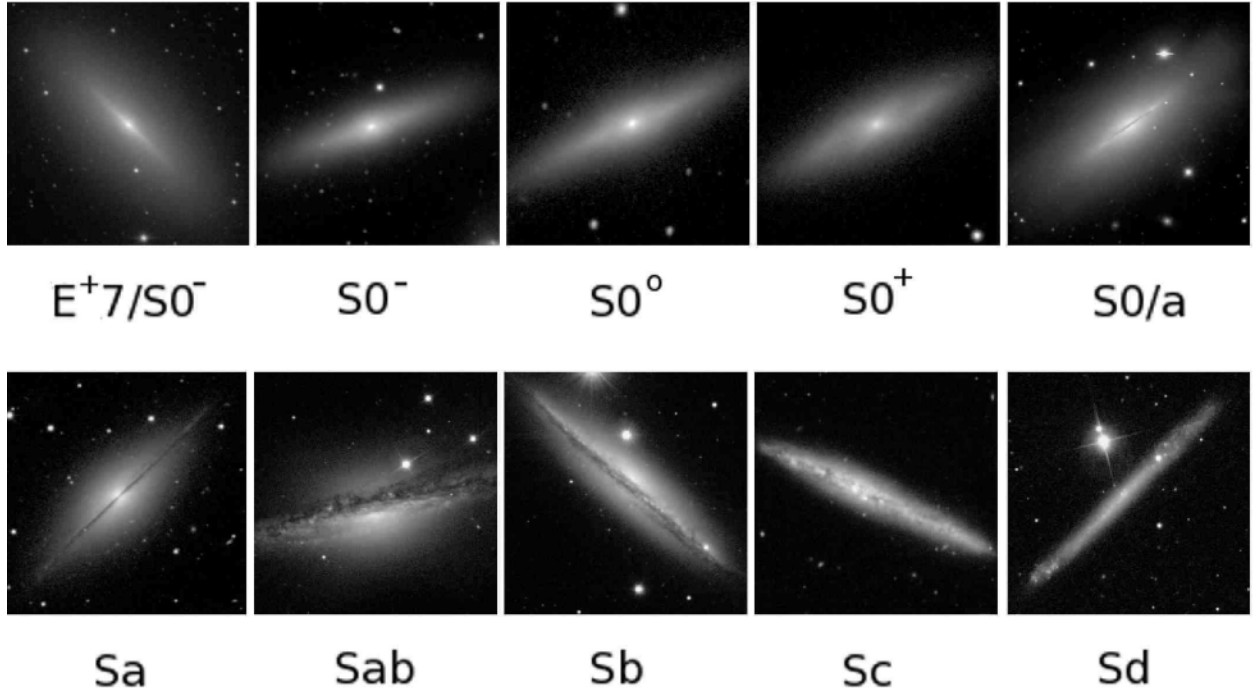


Fig. 11.— Classification of edge-on galaxies by stage. The galaxies are (left to right): Row 1 - NGC 3115, 1596, 7332, 4425, and 5866; Row 2 - NGC 7814, 1055, 4217, 4010, and IC 2233. All images are from the dVA (B and V filters).

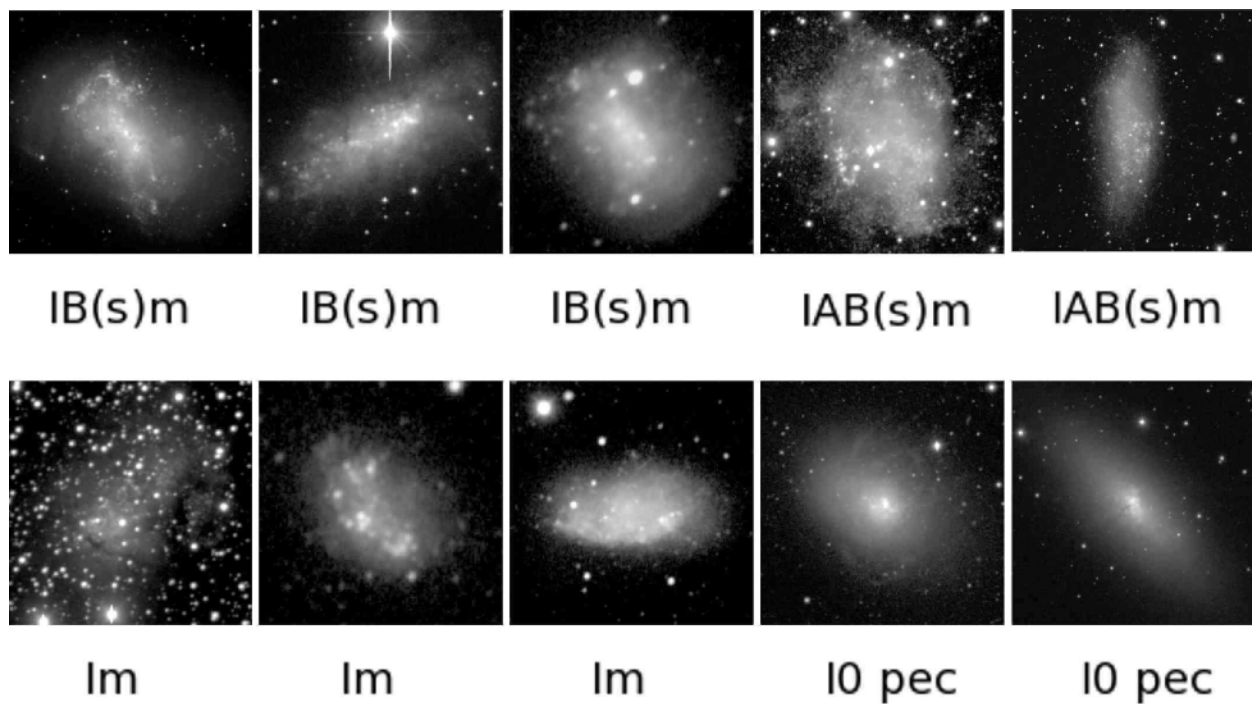


Fig. 12.— Examples of irregular galaxies ranging in absolute blue magnitude from -14 to -18 . The galaxies are (left to right): Row 1 - NGC 4449, 1569, 1156, DDO 50, and A2359-15 (WLM galaxy); Row 2 - IC 10, DDO 155, DDO 165, NGC 1705, NGC 5253. The “pec” stands for peculiar. All images are B -band from the dVA.

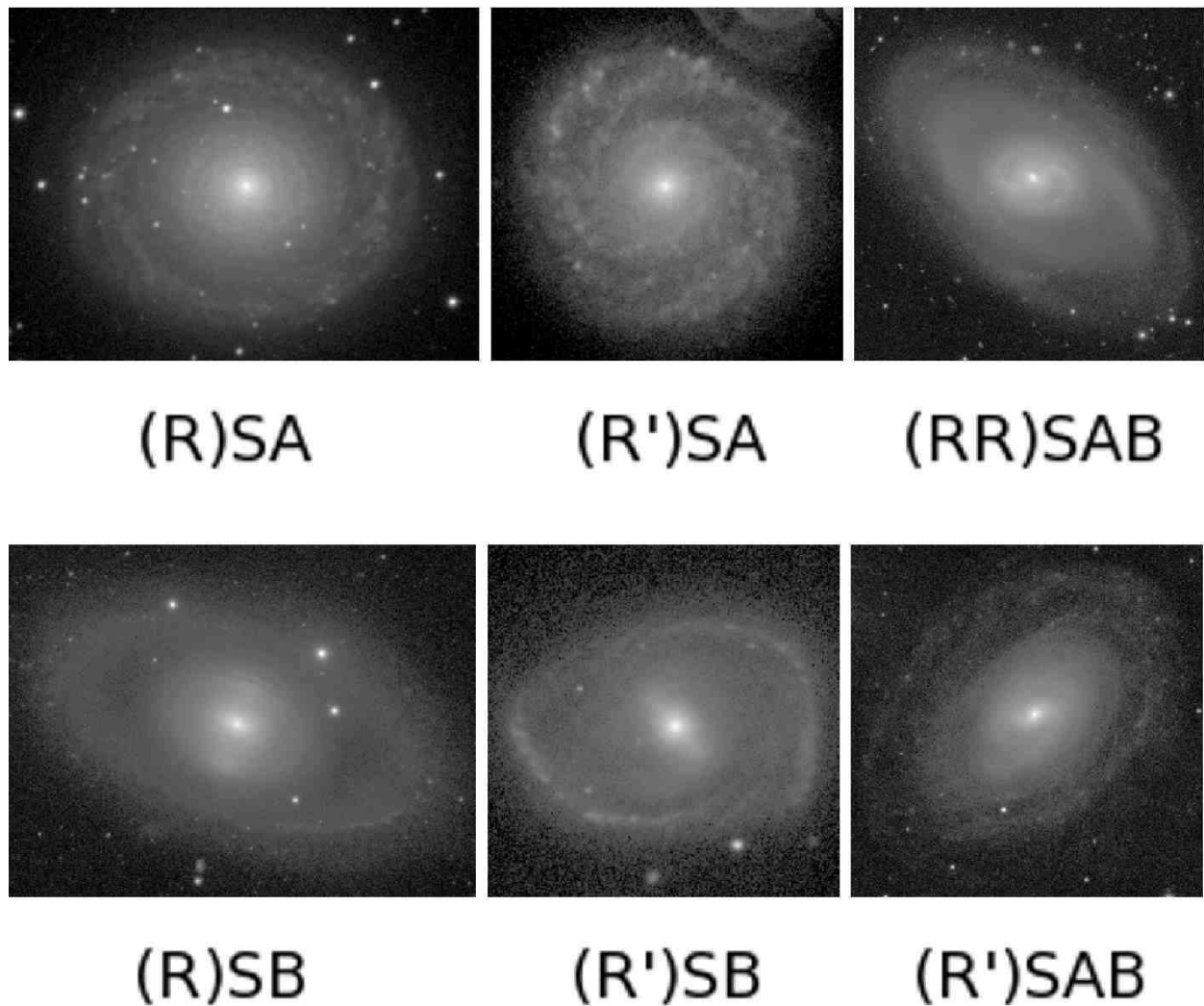
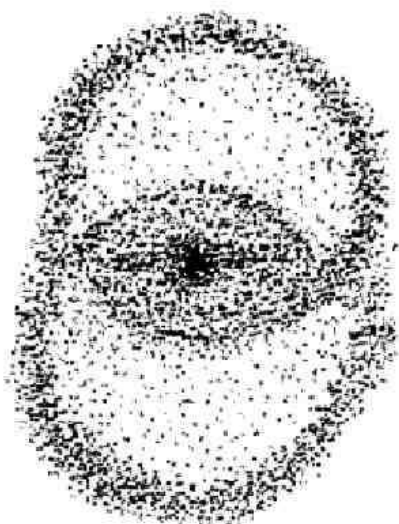


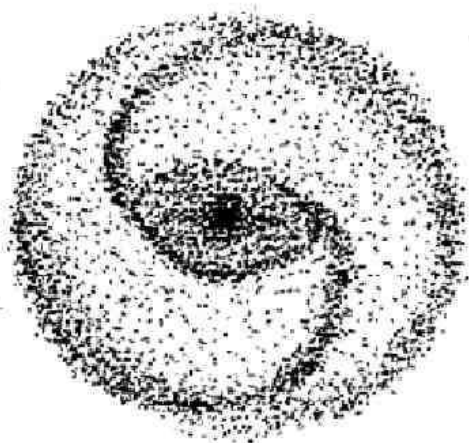
Fig. 13.— Examples of outer rings (R) and outer pseudorings (R') in barred and nonbarred galaxies. Also shown is a rare example with two largely detached outer rings (RR). The galaxies are (left to right): Row 1 - NGC 7217, IC 1993, and NGC 2273; Row 2 - NGC 3945, NGC 1358, and NGC 1371. All images are from the dVA and are *B*-band except for NGC 2273, which is *r*-band.



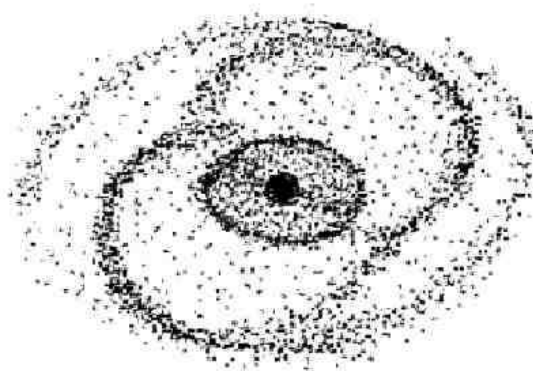
NGC 2665 R_1'



ESO 509-98 $R_1 R_2'$



ESO 325-28 R_2'



ESO 507-16 $R_1 R_2'$

Fig. 14.— Schematic representations of outer Lindblad resonance (OLR) morphologies (Buta & Combes 1996).

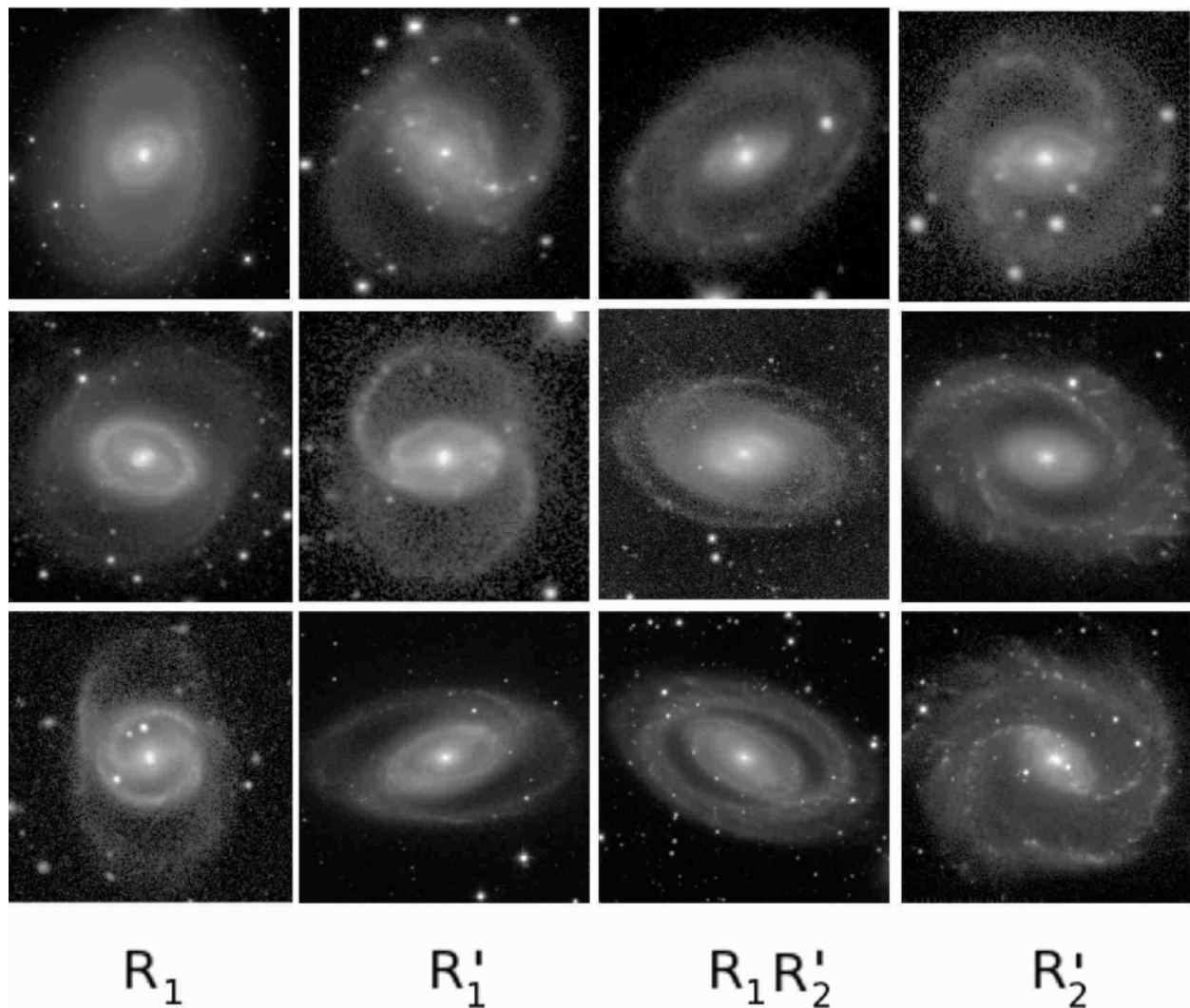
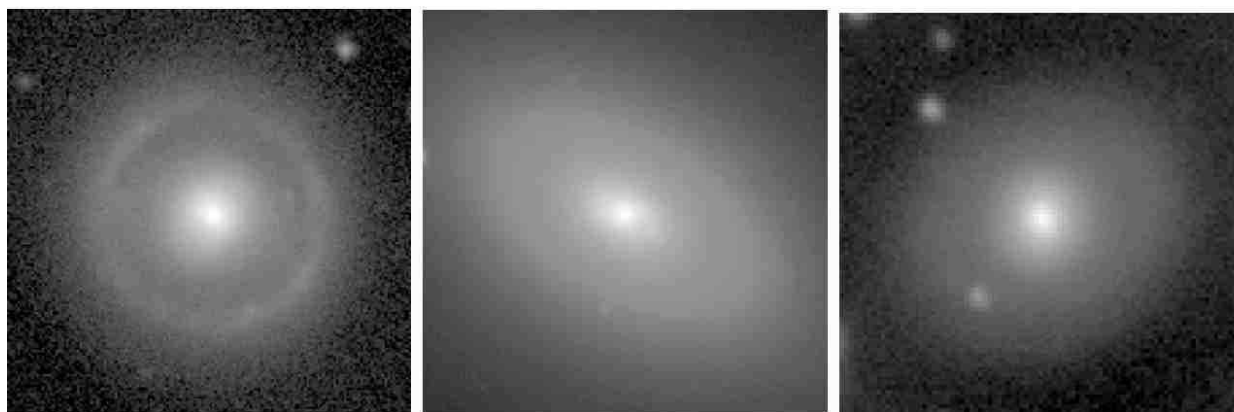


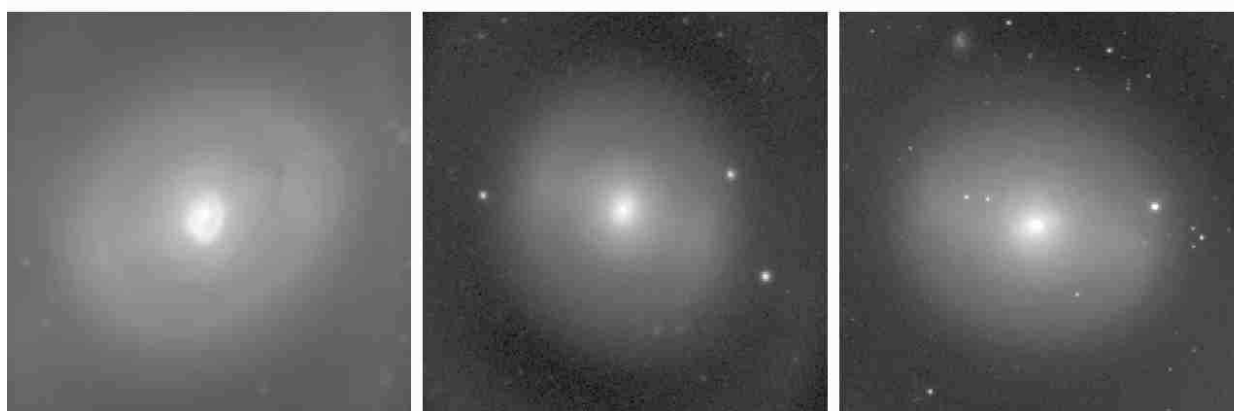
Fig. 15.— Examples of OLR subclasses of outer rings and pseudorings. The galaxies are (left to right): Row 1 - NGC 1326, NGC 2665, ESO 509–98, and ESO 325–28; Row 2 - NGC 3081, UGC 12646, NGC 1079, and NGC 210; Row 3 - NGC 5945, 1350, 7098, and 2935. All images are B -band from the dVA.



SA(r)

SA(rl)

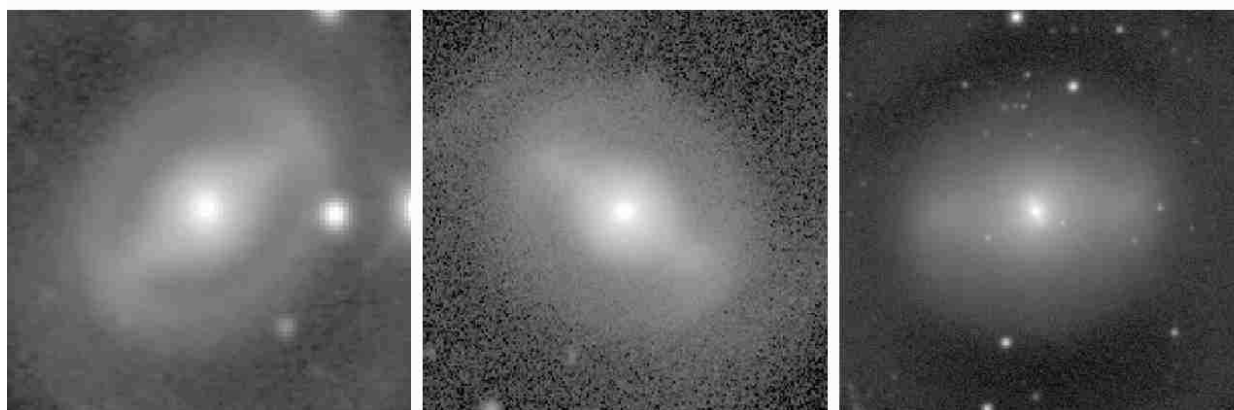
SA(l)



SAB(r)

SAB(rl)

SAB(l)



SB(r)

SB(rl)

SB(l)

Fig. 16.—

Fig. 16. cont.— Examples showing the continuity of inner rings (r) and lenses (l), for barred and nonbarred galaxies. The galaxies are (left to right): Row 1 - NGC 7187, 1553, and 4909; Row 2 - NGC 1326, 2859, and 1291; Row 3 - ESO 426–2, NGC 1211, NGC 1543. All images are B or g -band from the dVA.

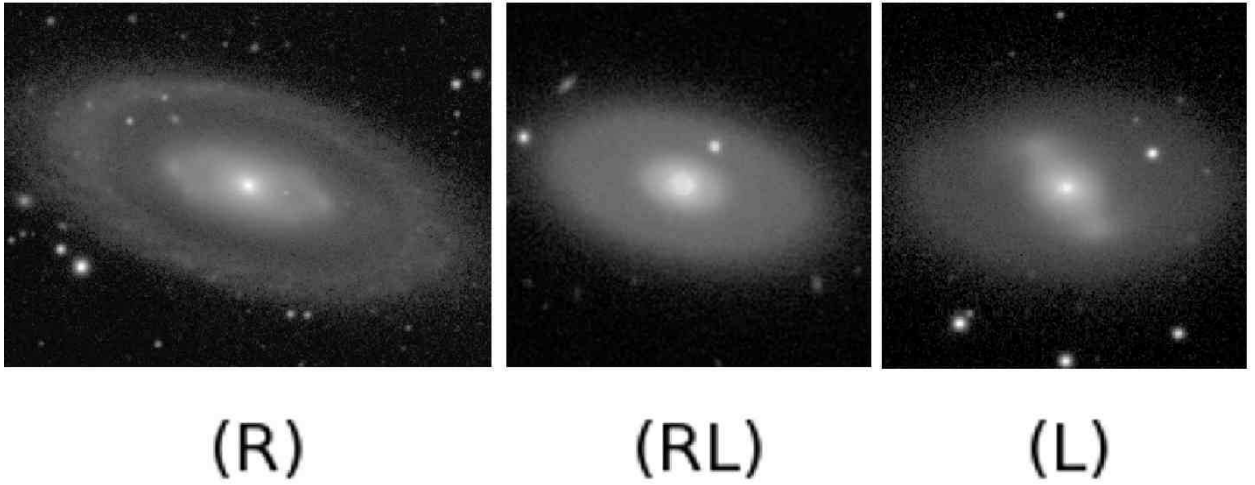
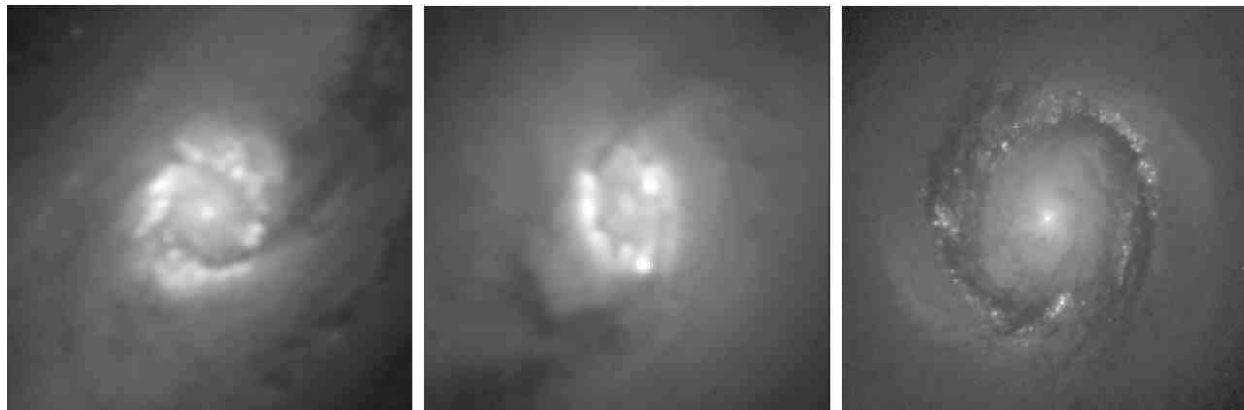
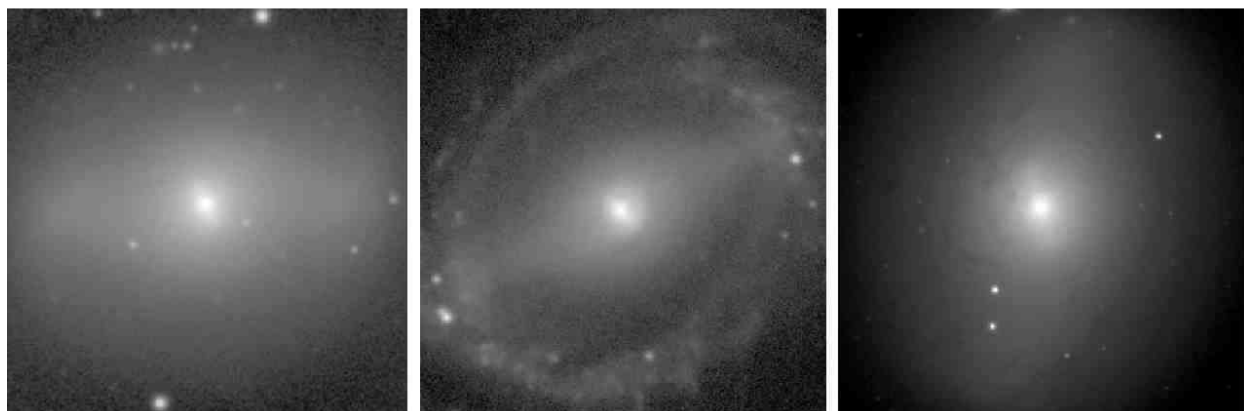


Fig. 17.— Examples showing the continuity of outer rings (R) and lenses (L). The galaxies are (left to right): - NGC 7020 (dVA *B*), NGC 5602 (SDSS image), and 2983 (dVA *B*).



nuclear rings (nr)



nuclear bars (nb)

Fig. 18.— Examples of nuclear rings and secondary (nuclear) bars. The galaxies are (left to right): Row 1 - NGC 1097, 3351, and 4314; Row 2 - NGC 1543, 5850, and 1291. All images are *B*-band from the dVA.

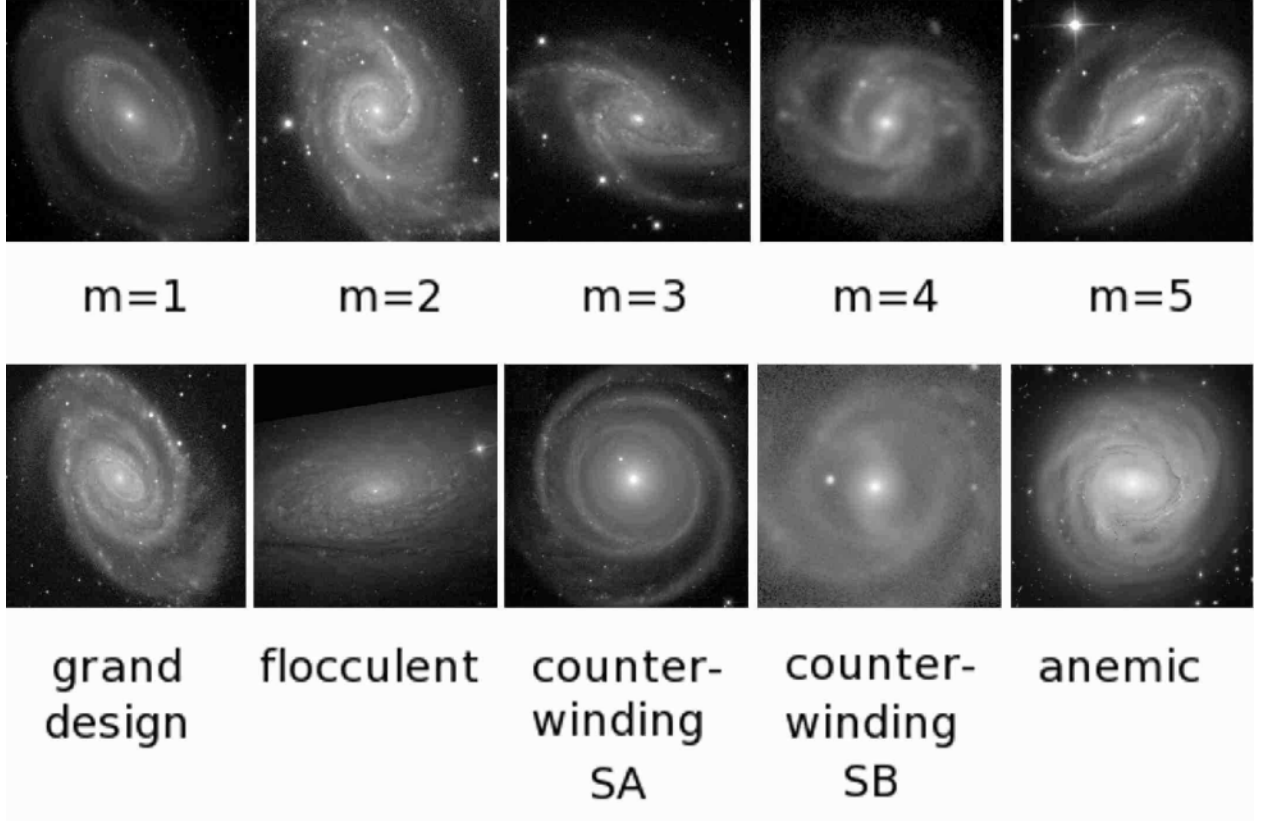


Fig. 19.— Examples showing spiral arm character differences in the form of arm multiplicity, grand design and flocculent spirals, counter-winding spirals, and an anemic spiral. The galaxies are (left to right): Row 1 - NGC 4725, 1566, 5054, ESO 566–24, and NGC 613; Row 2 - NGC 5364, 5055, 4622, 3124, and 4921. All images are B -band from the dVA except NGC 5055, which is SDSS g -band, and NGC 4921, which is from Hubble Heritage.

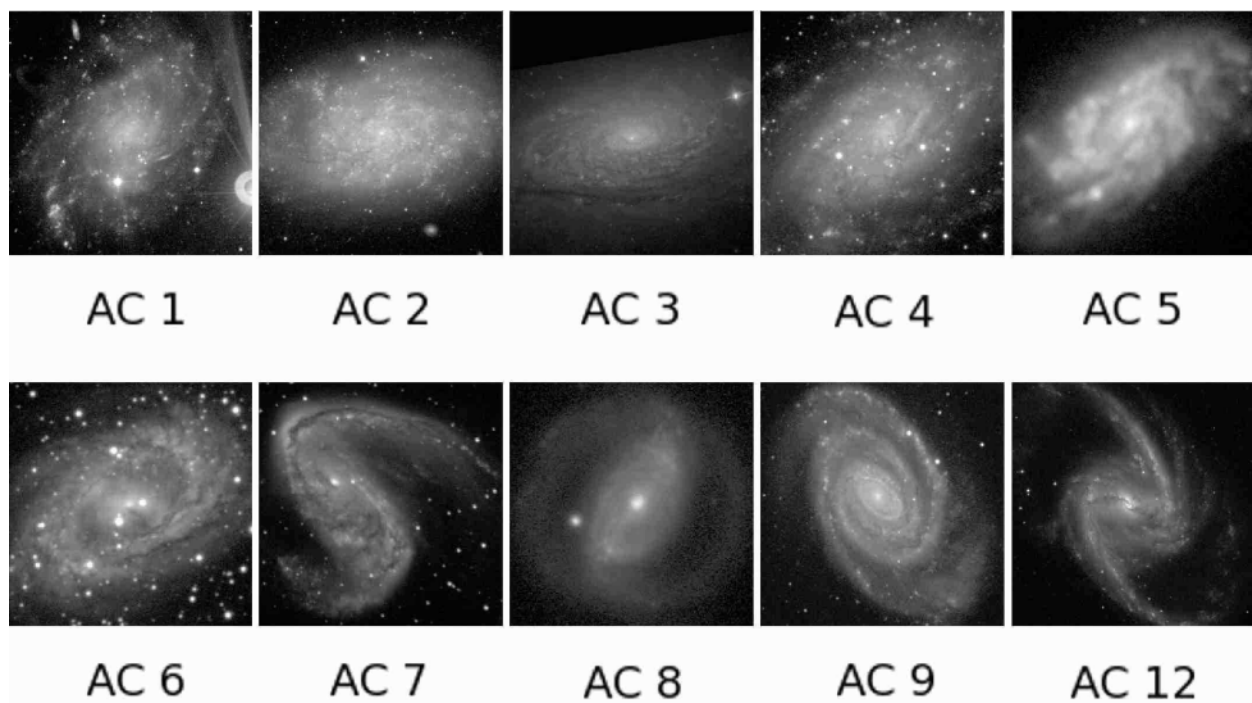


Fig. 20.— Examples showing the spiral arm classes of Elmegreen & Elmegreen (1987). The galaxies are (left to right): Row 1 - NGC 45, 7793, 5055, 2403, and 1084. Row 2: NGC 6300, 2442, 3504, 5364, and 1365. All images are *B*-band from the dVA, except NGC 5055 which is SDSS *g*-band.

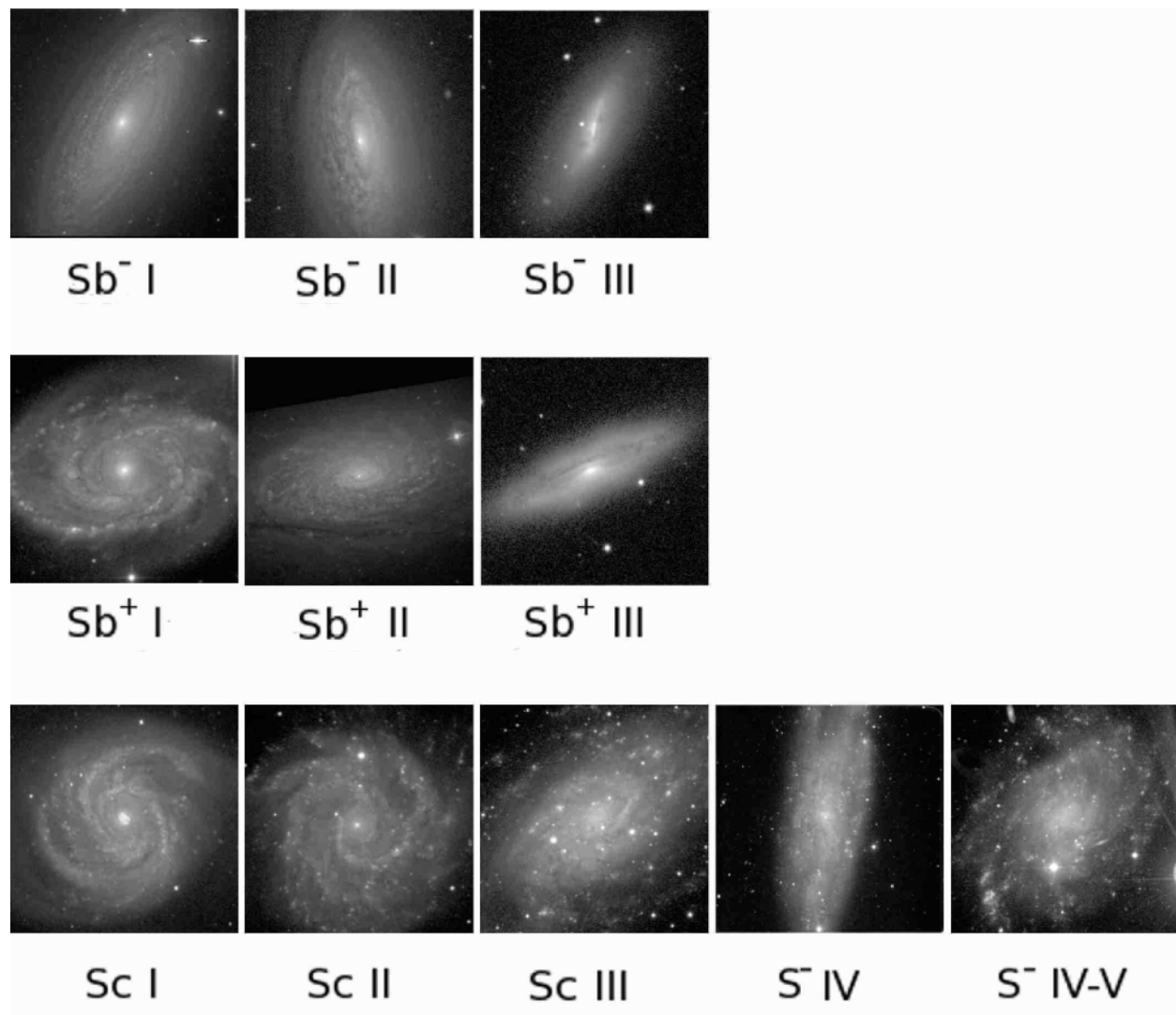


Fig. 21.— Examples showing van den Bergh luminosity classes. The galaxies are (left to right): Row 1 - NGC 2841 (dVA B), 3675 (SDSS g), and 4064 (SDSS g). Row 2: NGC 5371 (dVA B), 5055 (SDSS g), and 4586 (SDSS g). Row 3: NGC 4321, 3184, 2403, 247, and 45 (all dVA B). The classifications are in the van den Bergh system (see van den Bergh 1998).

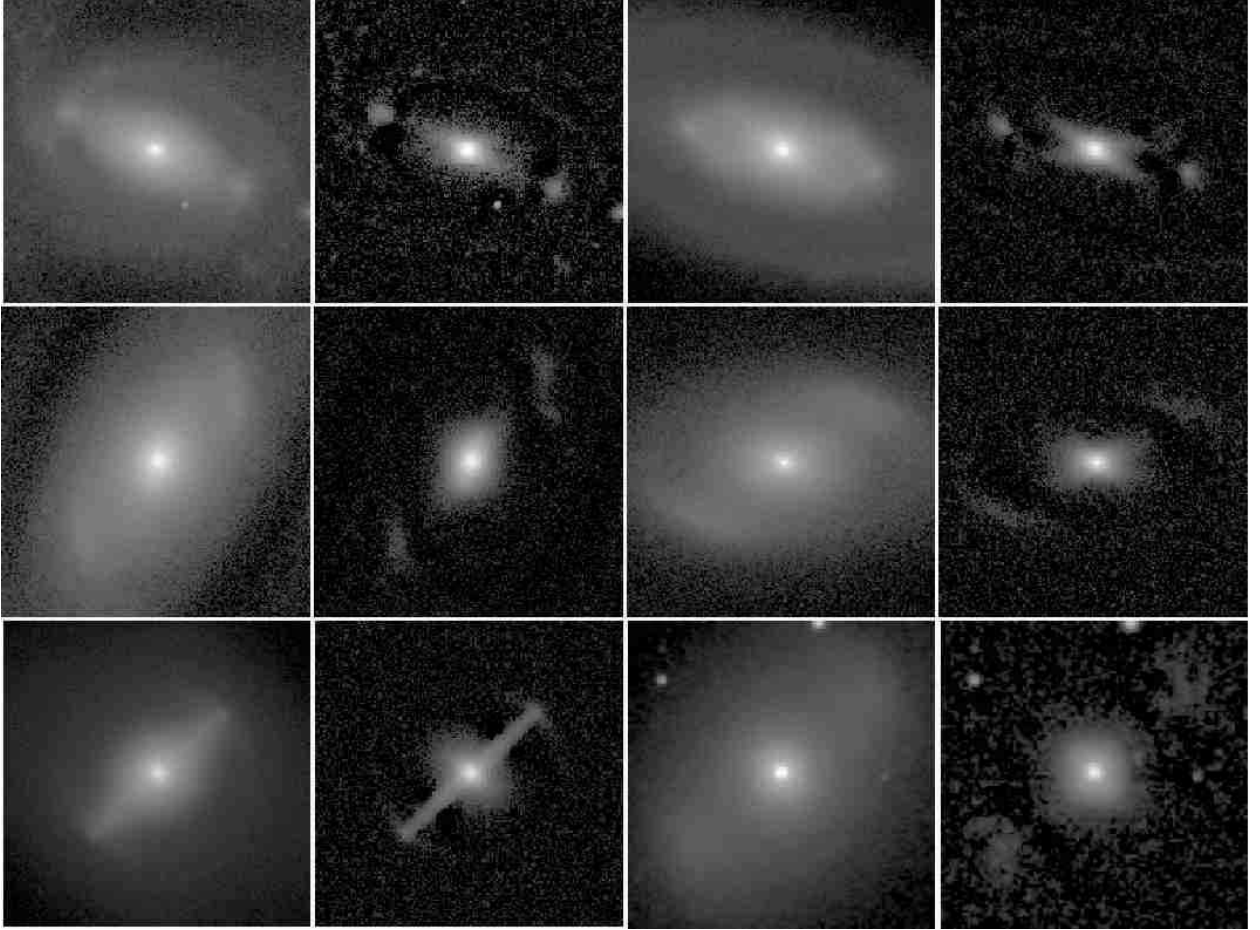


Fig. 22.— Examples showing ansae bar morphologies as compared to one mostly non-ansae bar. For each galaxy, the left frame is the full image while the right frame is an unsharp masked image, both in units of mag arcsec^{-2} . The galaxies are: (left to right): Row 1 - NGC 5375 (SDSS g) and 7020 (I) (both round ansae type); Row 2 - NGC 7098 (I , linear, partly wavy ansae) and NGC 1079 (K_s , curved ansae); Row 3 - NGC 4643 (I , mostly non-ansae type with trace of ring arcs at bar ends) and NGC 4151 (OSUBSGS H , irregular ansae).

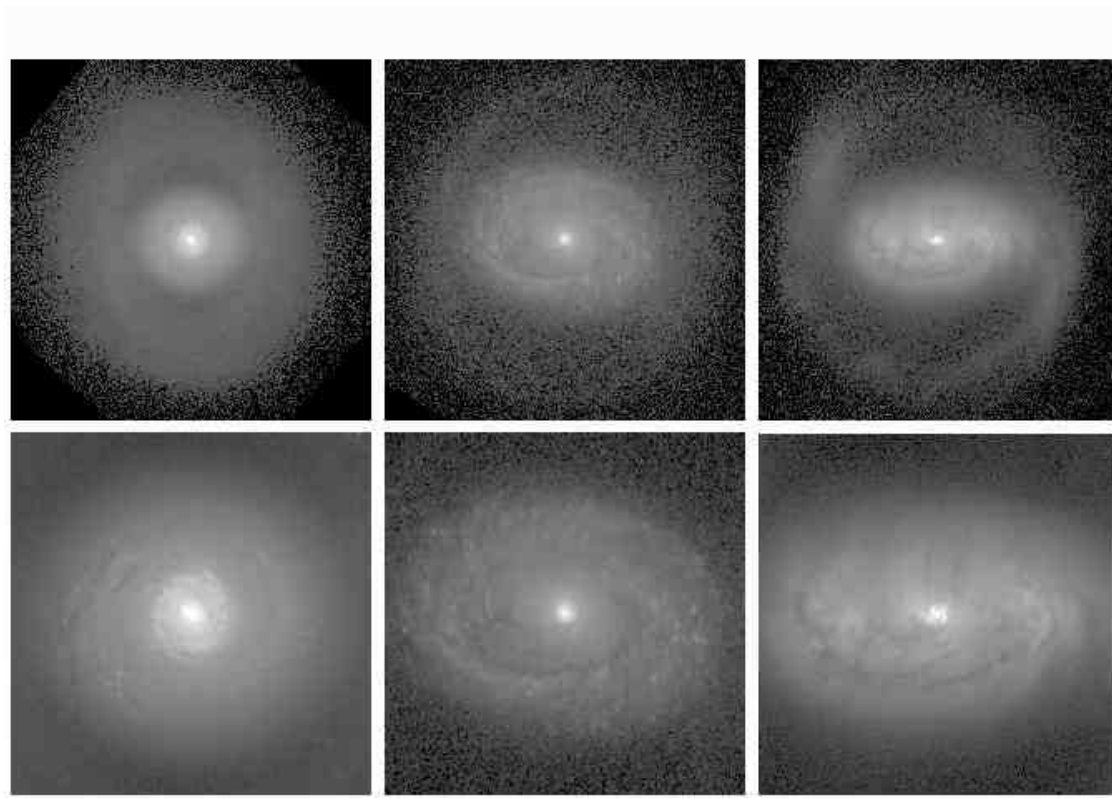


Fig. 23.— Examples of oval disk galaxies. Left to right: NGC 4736 (*B*), NGC 4941 (*B*), and NGC 1808 (*V*). The images are cleaned of foreground and background objects and have been deprojected and rotated so that the major axis of the oval is horizontal. The upper panels show the ovals imbedded within outer rings, while the lower panels focus on the ovals alone.

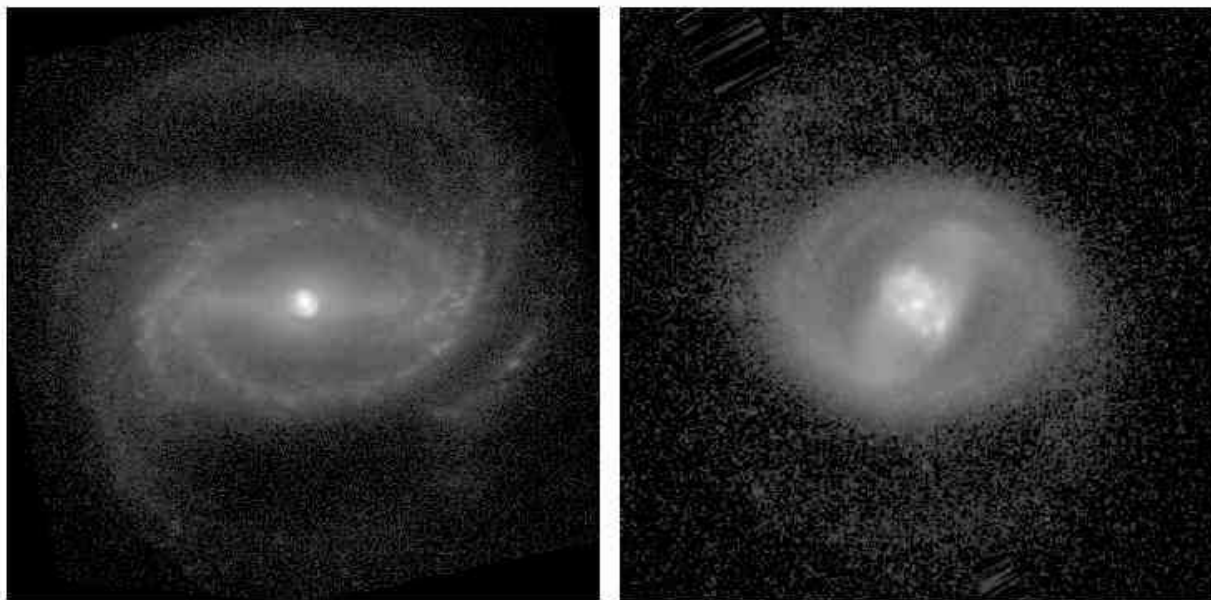


Fig. 24.— Examples of two galaxies having highly a elongated inner ring at the boundary of a broad oval. Left to right: NGC 1433, ESO 565–11 (both *B*-band). Each galaxy also has a prominent bar which is aligned with the oval and inner ring in NGC 1433, but misaligned with these features in ESO 565–11. ESO 565–11 also has a highly elongated, large nuclear ring of star-forming regions.

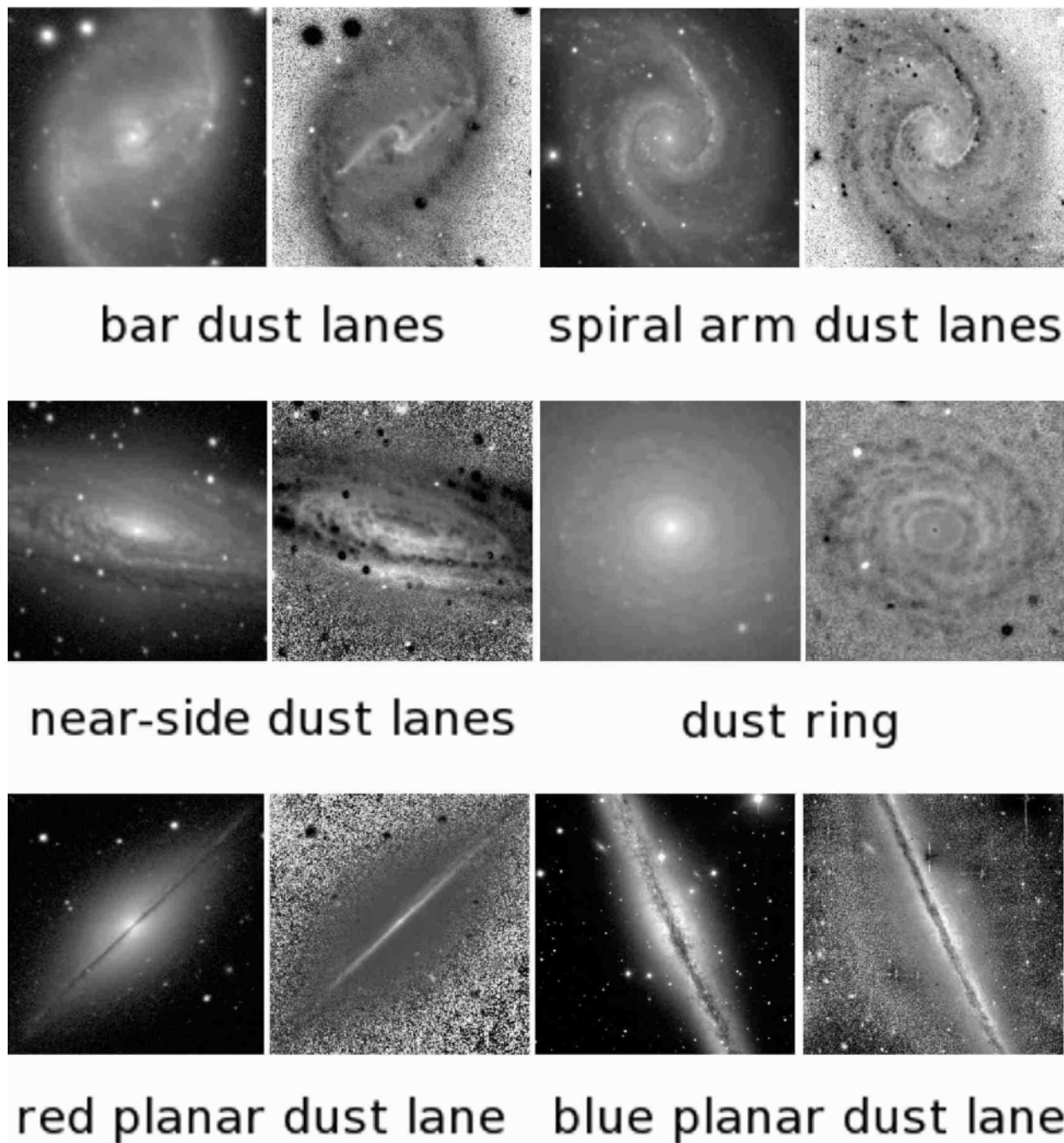
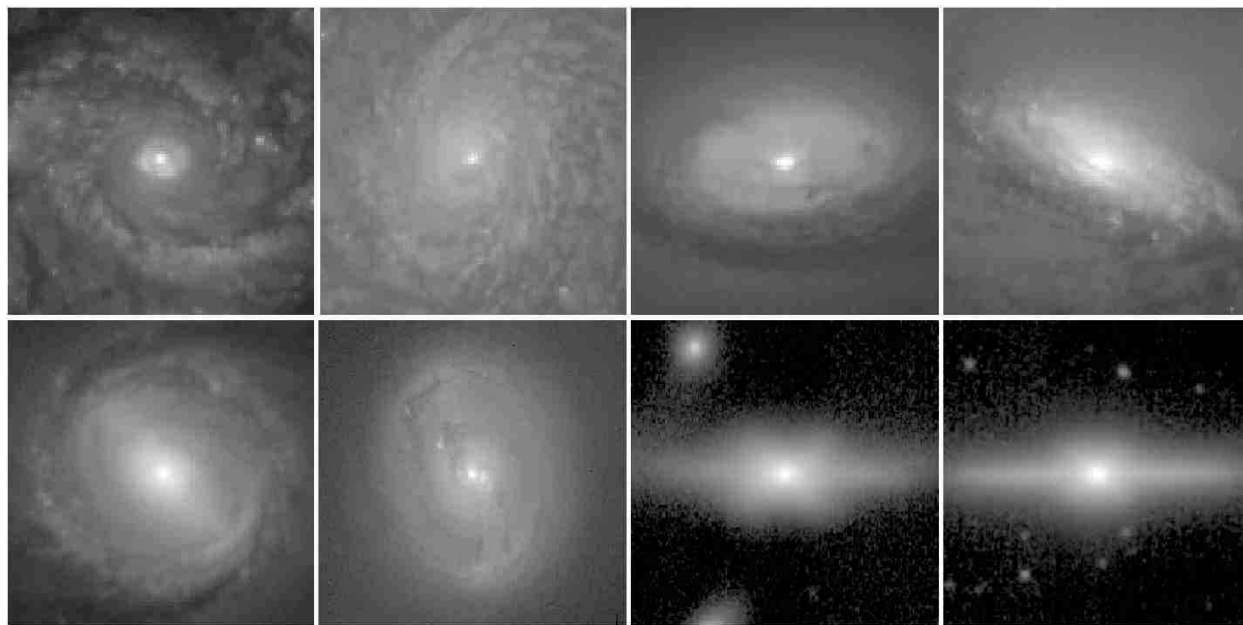
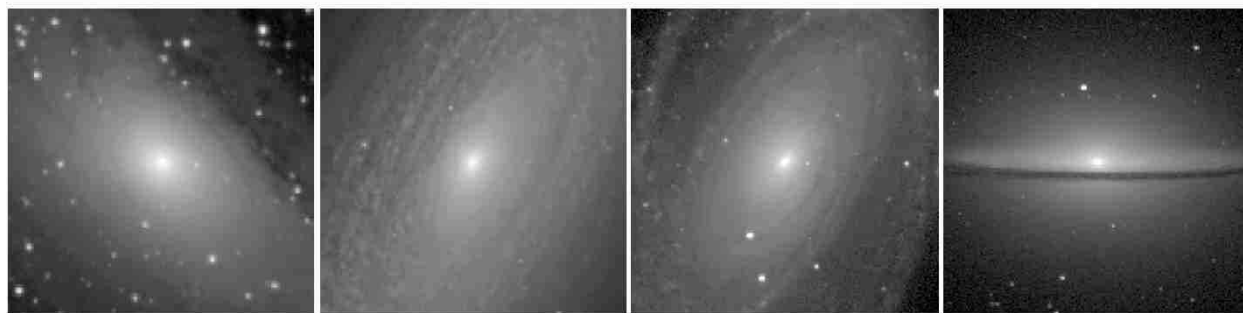


Fig. 25.— Examples showing different classes of dust lanes (left to right) - Row 1 NGC 1530, V -band image and $V - K_s$ color index map; NGC 1566, B -band and $B - K_s$ color index map; Row 2 - NGC 7331, B -band image and $B - I$ color index map; NGC 7217, B -band image and $B - I$ color index map; Row 3 - NGC 7814, B -band image and $B - I$ color index map; NGC 891, B -band and $B - V$ color index map.



"pseudobulges"



"classical bulges"

Fig. 26.— Examples of pseudobulges and classical bulges in spiral galaxies (left to right): Row 1: NGC 3177, 4030, 5377, and 1353 (all HST wide V -band filter F606W; KK04); Row 2: NGC 6782 (I -band, F814W), 3081 (wide B , F450W), 128 (K_s), and 1381 (K_s); Row 3: NGC 224 (M31), 2841, 3031 (M81), and 4594 (M104) (all B -band). The images of NGC 128 and 1381 are from Bureau et al. (2006).

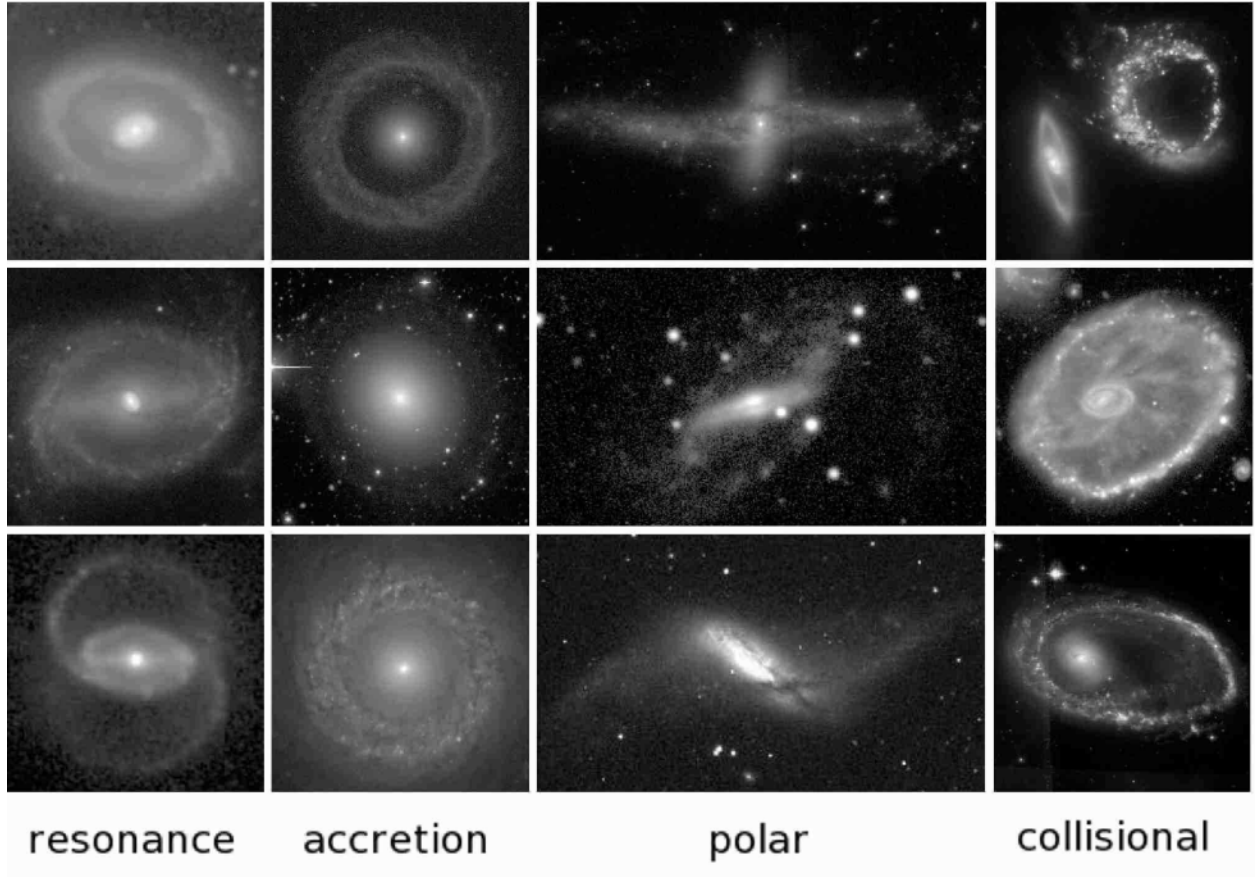


Fig. 27.— Different classes of ring phenomena seen in galaxies (top to bottom): Column 1 - NGC 3081, NGC 1433, and UGC 12646. Column 2 - Hoag’s Object, IC 2006, and NGC 7742; Column 3 - NGC 4650A, ESO 235–58, and NGC 660; Column 4 - Arp 147, the Cartwheel, and the Lindsay-Shapley ring. All images are from the dVA except Arp 147.

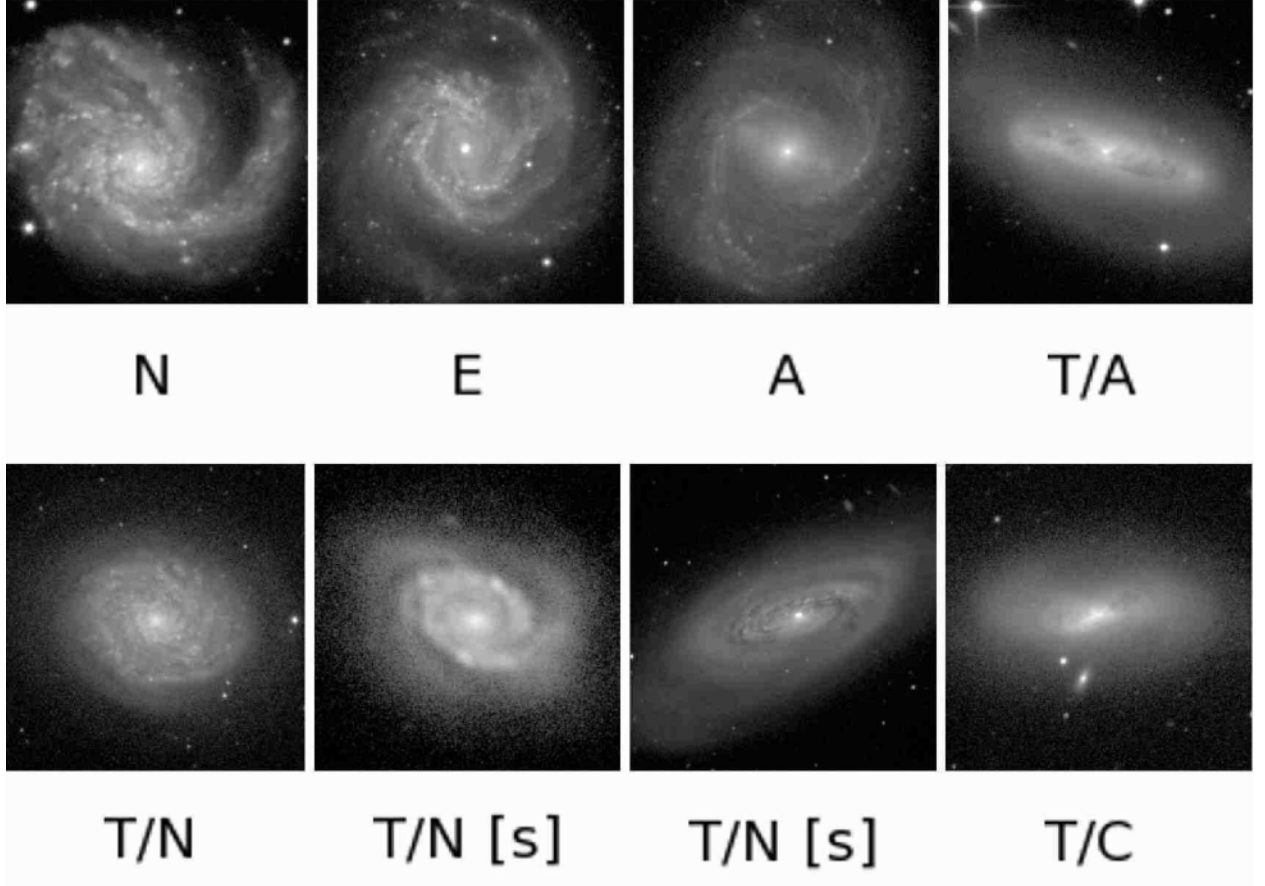
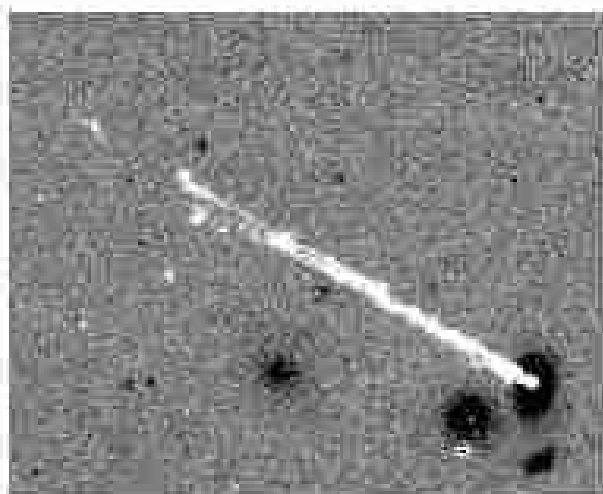


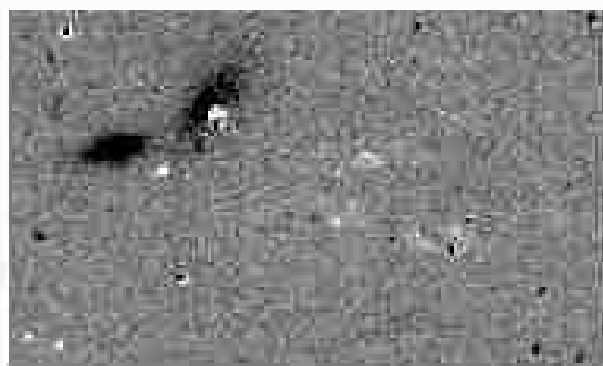
Fig. 28.— Blue light morphologies of eight Virgo Cluster spirals having different Koopmann & Kenney (2004) $H\alpha$ star formation morphologies. The galaxies are (left to right): Row 1: NGC 4254 (normal N); NGC 4303 (Enhanced E); NGC 4548 (Anemic A); NGC 4293 (Truncated/Anemic T/A); Row 2: NGC 4689 (Truncated/Normal T/N); NGC 4580 and 4569 (Truncated/Normal (severe) T/N [s]); NGC 4424 (Truncated/Compact T/C). Images are dVA B , except for NGC 4424 which is SDSS g .



connected H-alpha clouds with disk star formation



connected H-alpha clouds without disk star formation



detached H-alpha clouds

Fig. 29. (cont.).— Three galaxies in a possible evolutionary stripping sequence in the Coma Cluster. The images and categories are from Yagi et al. (2010). The left frames are B -band images in units of mag arcsec^{-2} , while the right frames are net $\text{H}\alpha$ images in linear intensity units (called NB–R by Yagi et al.). From top to bottom, the galaxies are GMP 3816, GMP 2910, and GMP 2923. The idea is that GMP 3816 is in an earlier phase of stripping, such that there is still considerable disk ionized gas; GMP 2910 is in a more advanced phase with still connected clouds but an absence of disk emission; and finally GMP 2923 is in the most advanced phase of the three, showing only scattered HII regions.

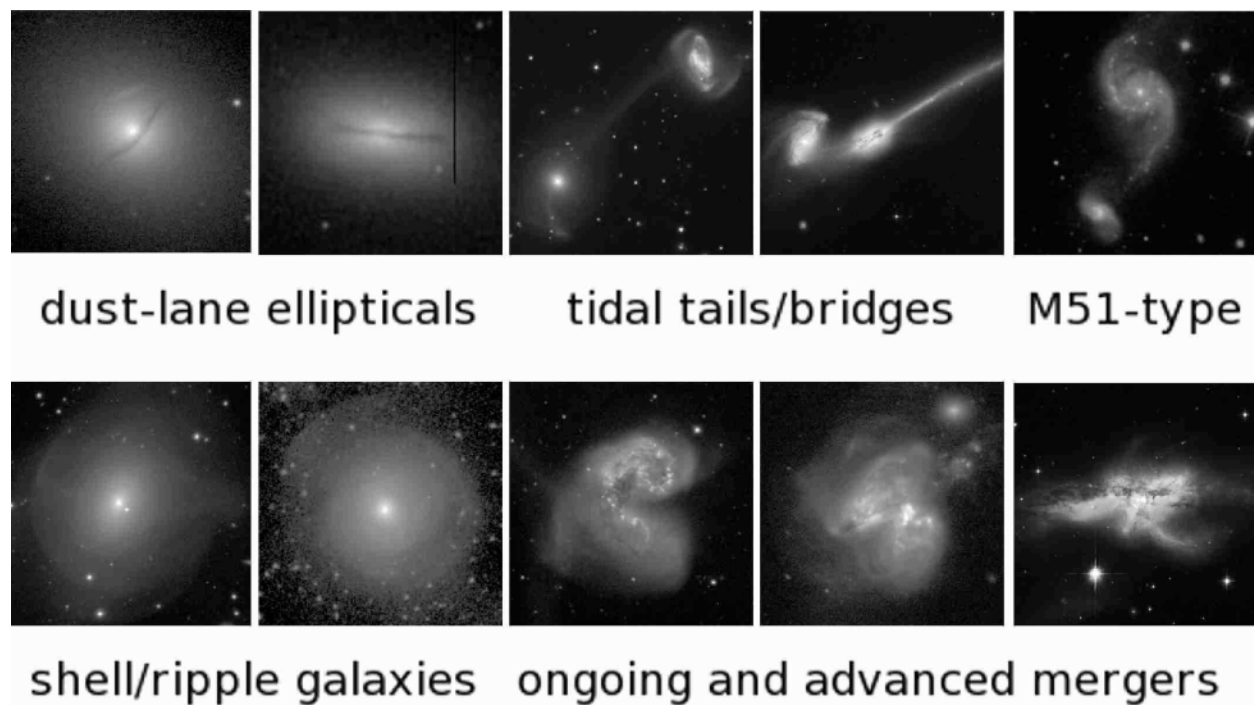


Fig. 30.— Interacting and peculiar galaxies. The galaxies are (left to right): Row 1: NGC 5485 (SDSS), 4370 (SDSS), 5216/18 (A. Block), 4676 (Hubble Heritage), and 2535-6 (SDSS); Row 2: NGC 2865, 474, 4038-9, 3690, and 6240, all *B* except NGC 474, which is a $3.6\mu\text{m}$ image (section 12).

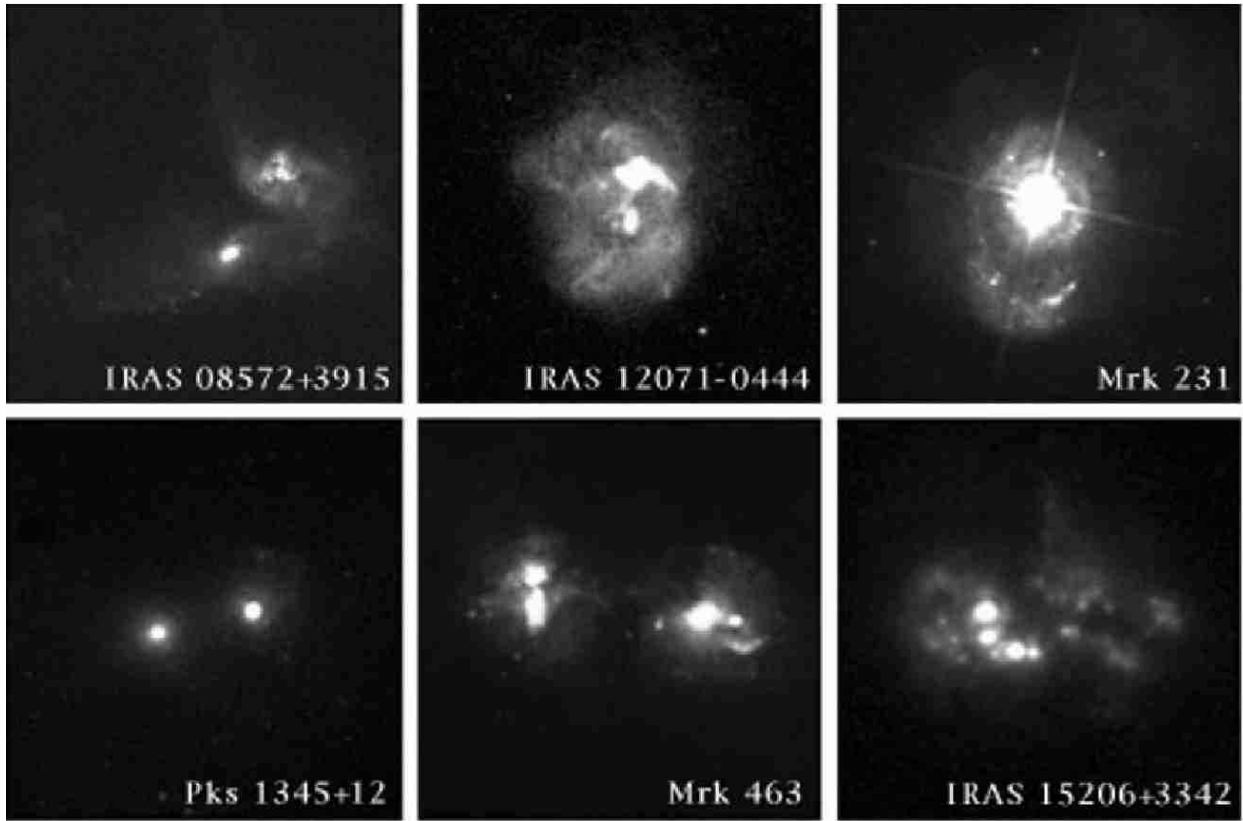


Fig. 31.— The morphologies of six “ultra-luminous infrared galaxies” from HST optical/near-IR imaging (Surace et al. 1998). These images are not in units of mag arcsec^{-2} .



Fig. 32.— Three galaxies showing strong optical disk warping. Left to right: NGC 4762 (*B*), NGC 4452 (SDSS), UGC 3697 (Internet Encyc. of Science)

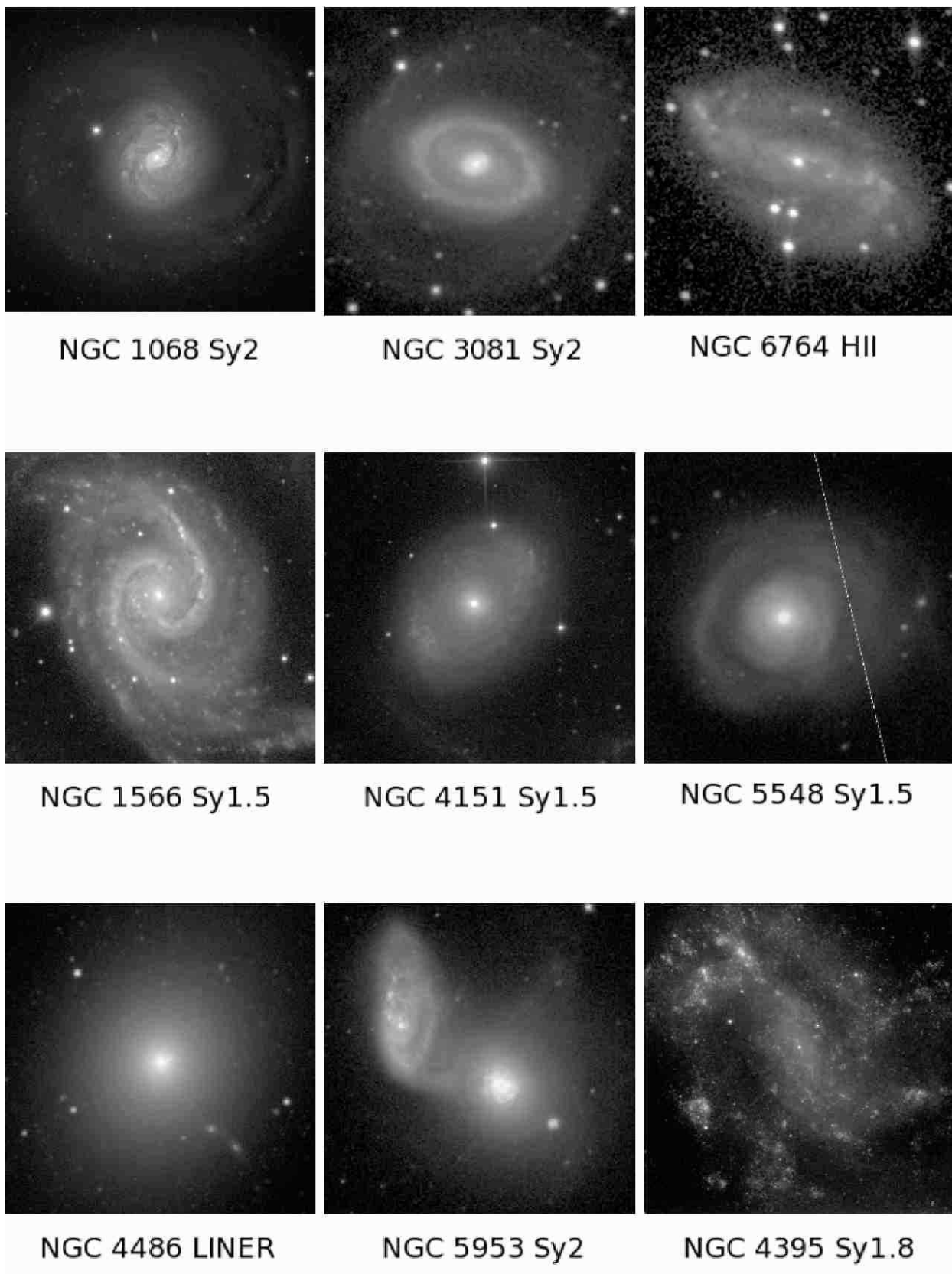


Fig. 33.— Images of nearby active galaxies, dVA *B*-band except for NGC 5548 and 5953, which are SDSS. The activity classification is from Veron-Cetty & Veron (2006).

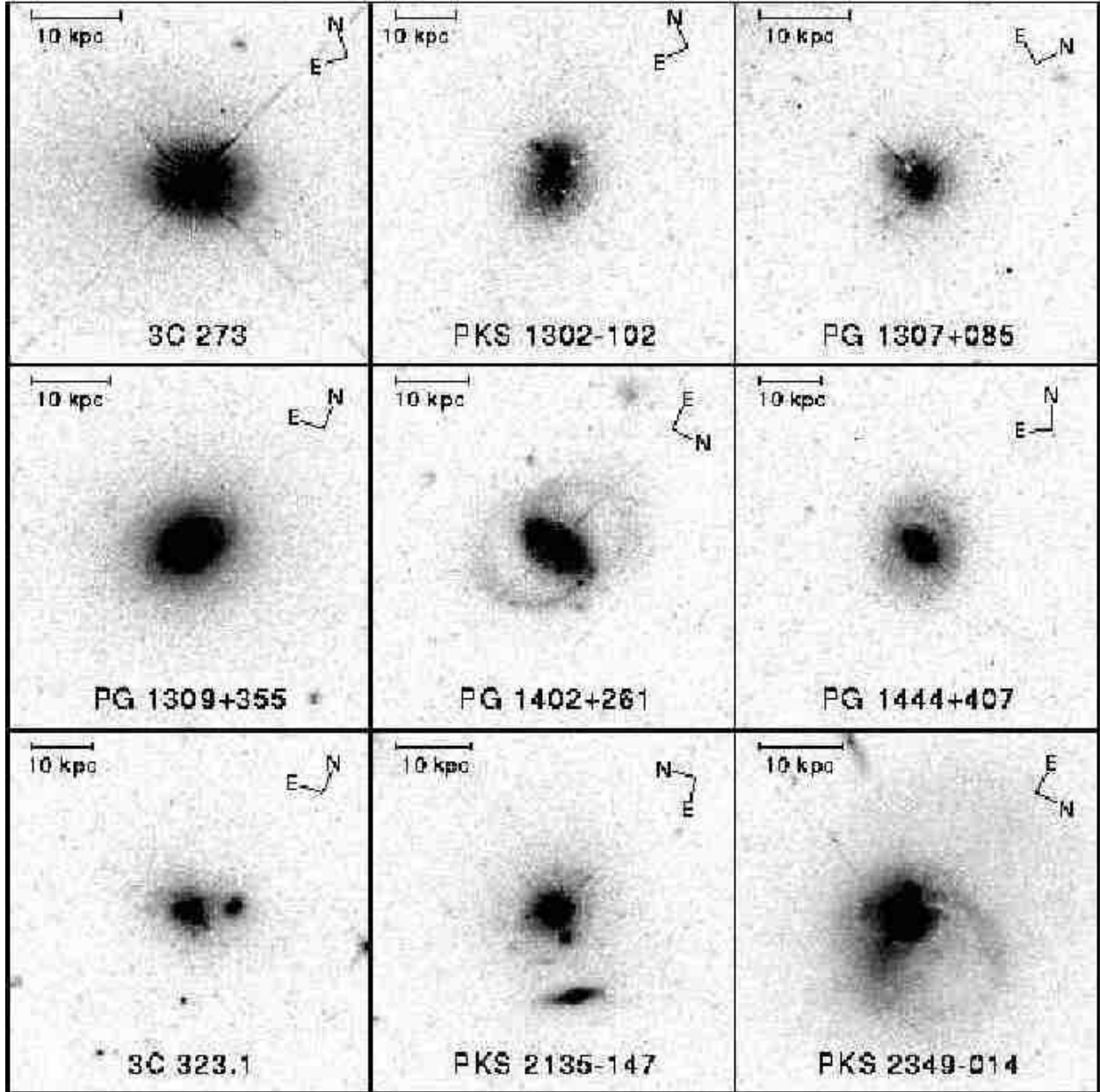


Fig. 34.— The morphologies of the host galaxies of nine nearby quasars, from Bahcall et al. (1997). These images are not in units of mag arcsec^{-2} .

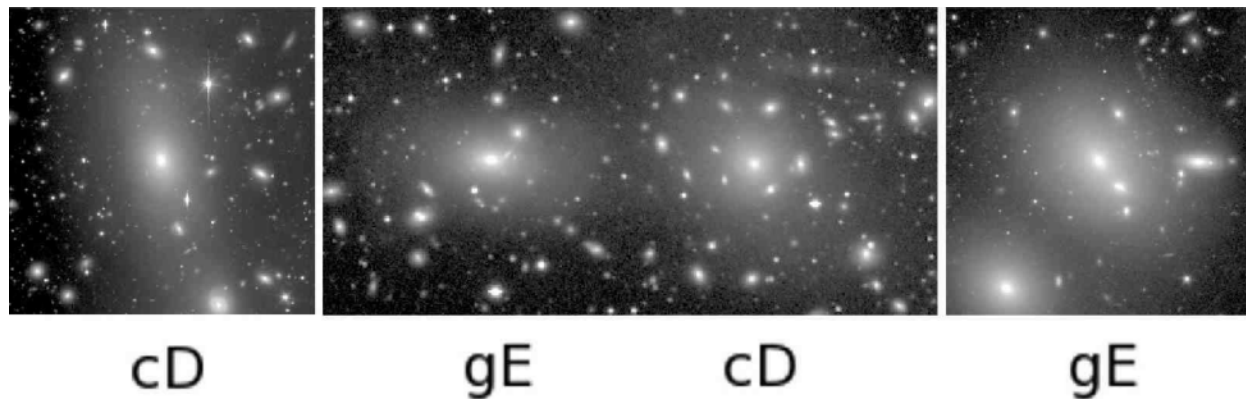


Fig. 35.— Deep images of the brightest members of three rich galaxy clusters (left to right): UGC 10143 in A2152 (R -band), NGC 4889 (left) and 4874 (right) in A1656 (B -band), and NGC 6041 (R -band) in A2151. The images of UGC 10143 and NGC 6041 are from Blakeslee (1999), while that of NGC 4874-89 is from the dVA.

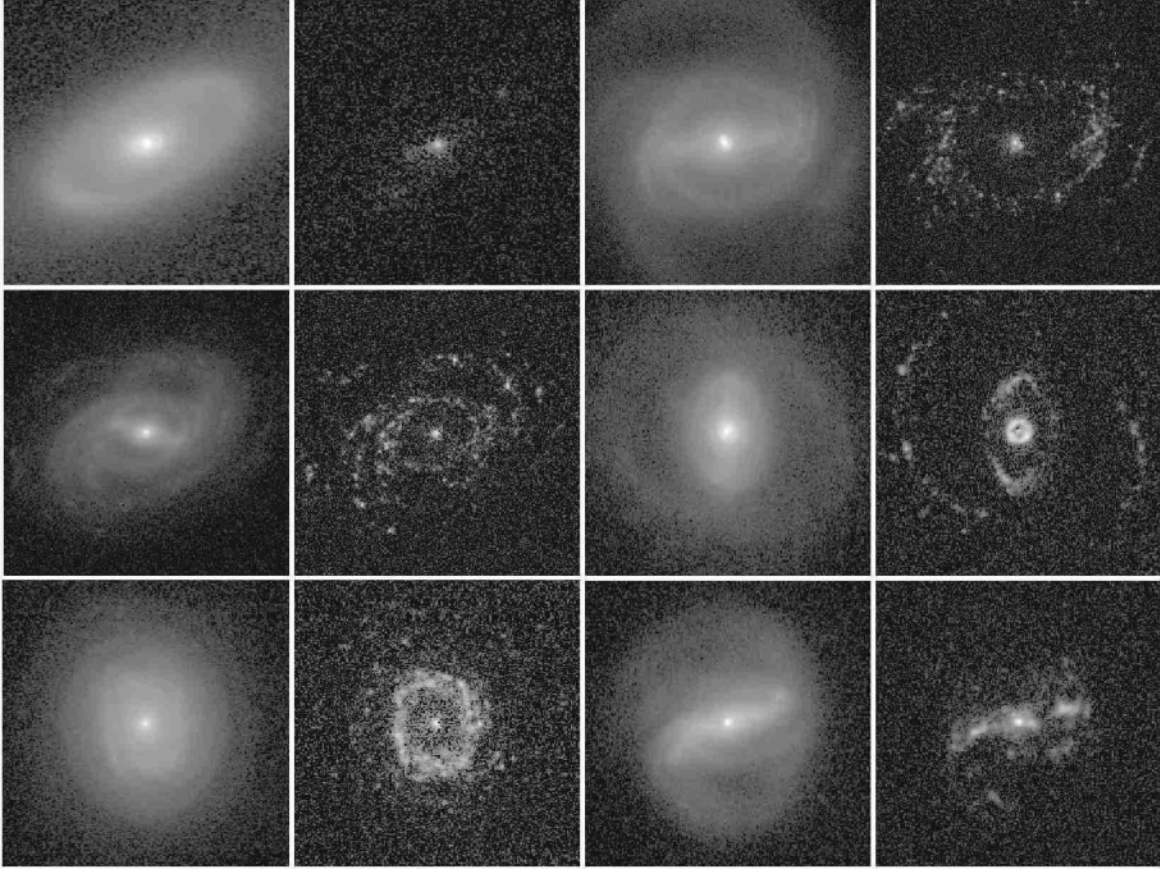


Fig. 36.— Red continuum (left) and net $H\alpha$ (right) images of six early-to-intermediate-type galaxies. The galaxies are (left to right): top row: NGC 7702, 1433; middle row: NGC 7329, 6782; bottom row: NGC 6935, 7267. From Crocker, Baugus, & Buta (1996).

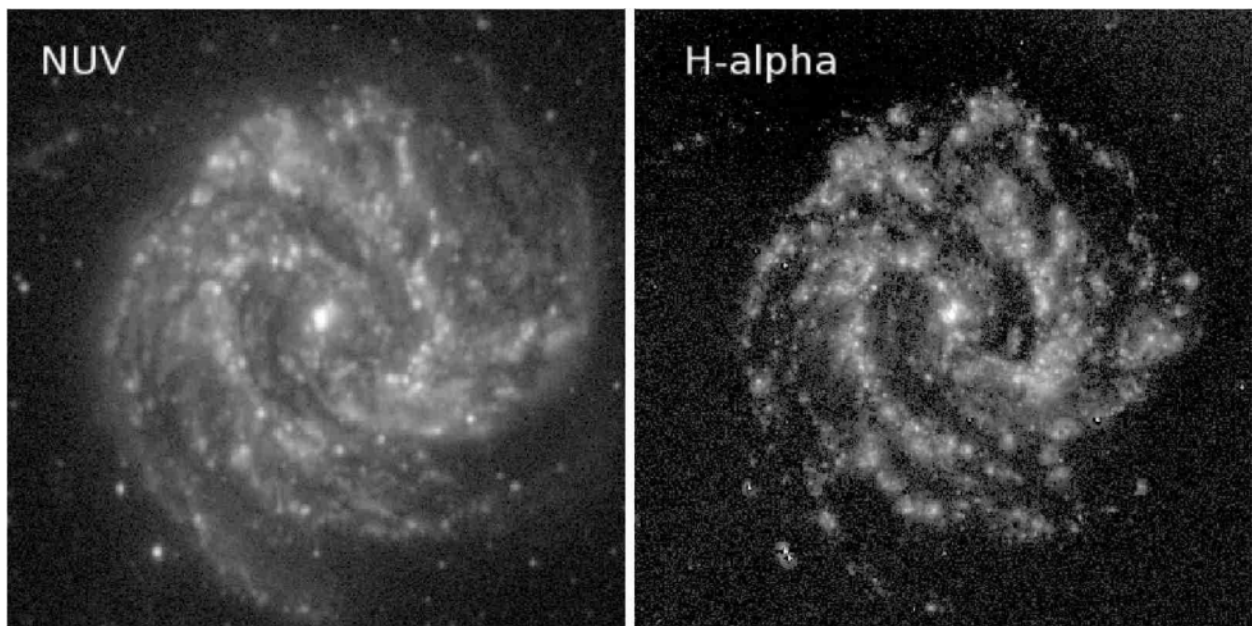


Fig. 37.— Comparison of a near-UV image ($0.225\mu\text{m}$) with an $\text{H}\alpha$ image for the nearby spiral galaxy M83.

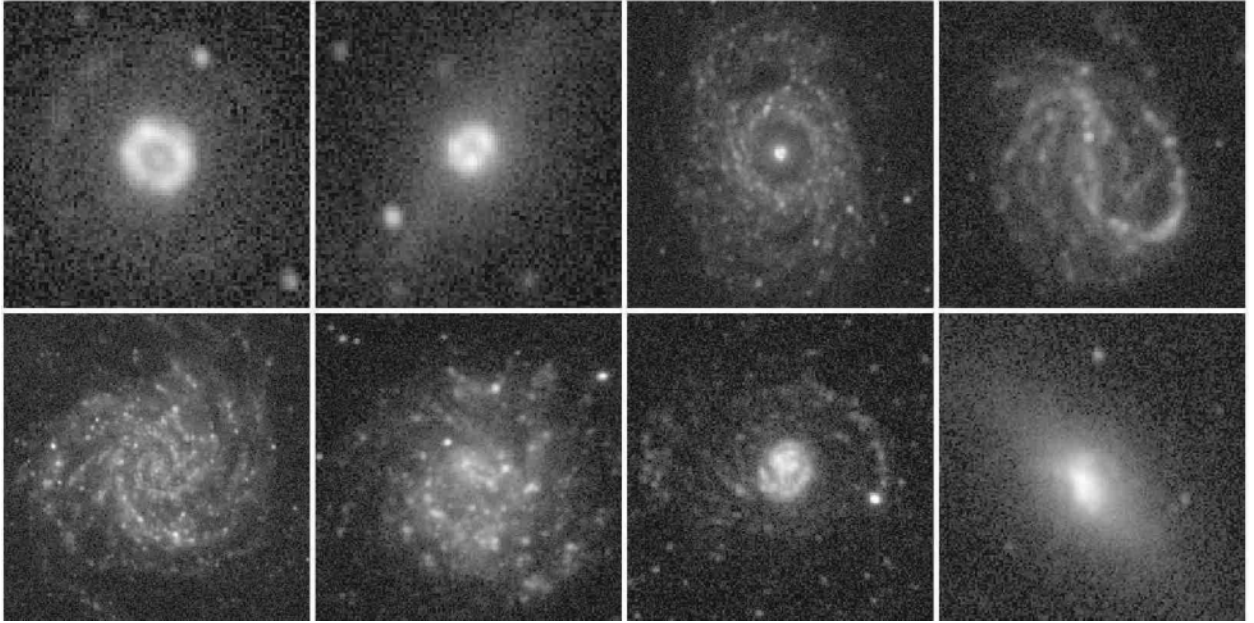


Fig. 38.— GALEX near-UV images of eight galaxies: (left to right) Top row: NGC 1317, 4314, 3351, and 7479; bottom row: NGC 628, 5474, 4625, and 5253

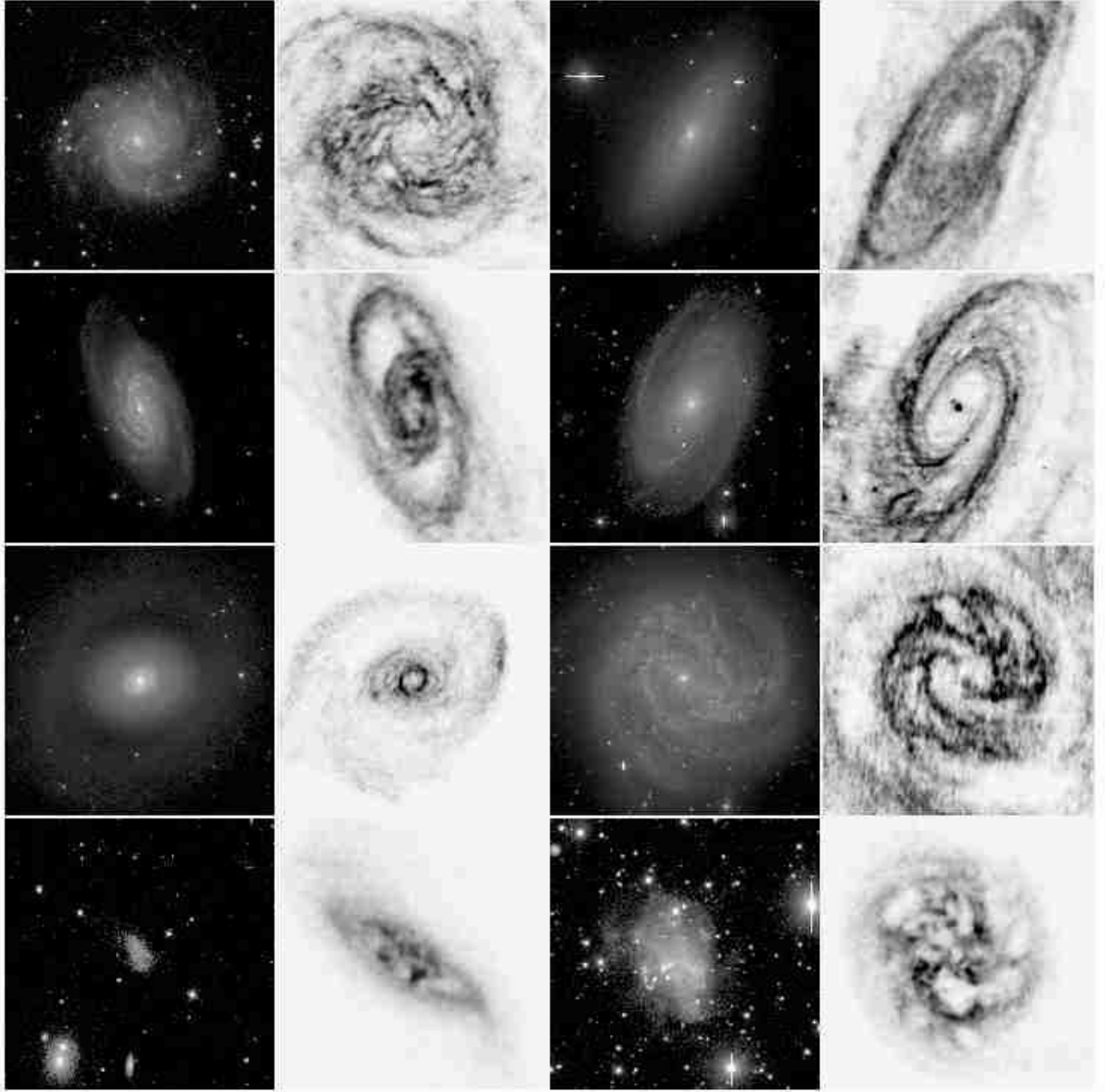


Fig. 39.— HI morphologies (Walter et al. 2008) of eight galaxies as compared to optical *B*-band morphologies. Left panels: NGC 628 (M74), NGC 4258 (M106), NGC 4736 (M94), and DDO 154. Right panels: NGC 2841, NGC 3031 (M81); NGC 5236 (M83), and DDO 50 (Ho II).

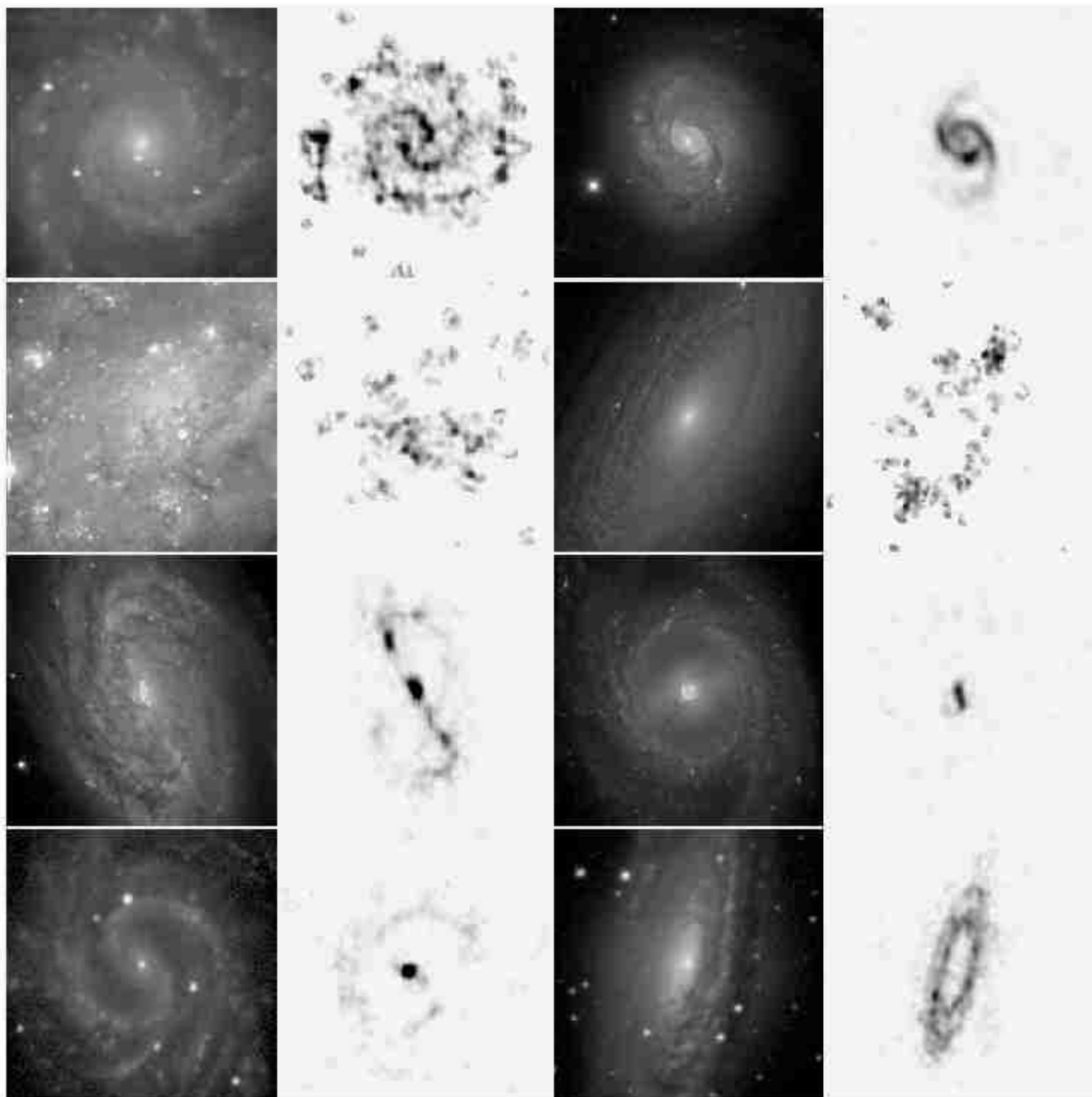


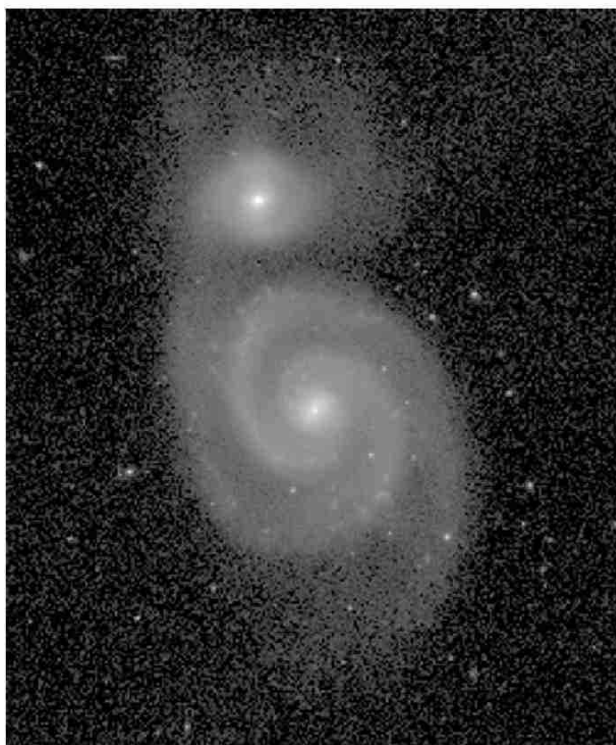
Fig. 40.— CO morphologies (Helfer et al. 2003) of eight galaxies as compared to optical *B*-band morphologies. Left panels: NGC 628 (M74), NGC 2403, NGC 2903, and NGC 4535. Right panels: NGC 1068 (M77), NGC 2841; NGC 3351 (M95), and NGC 7331.



FUV 0.15 microns



B 0.44 microns



K_s 2.2 microns



IRAC 3.6 microns

Fig. 41.— Multi-wavelength images of M51.

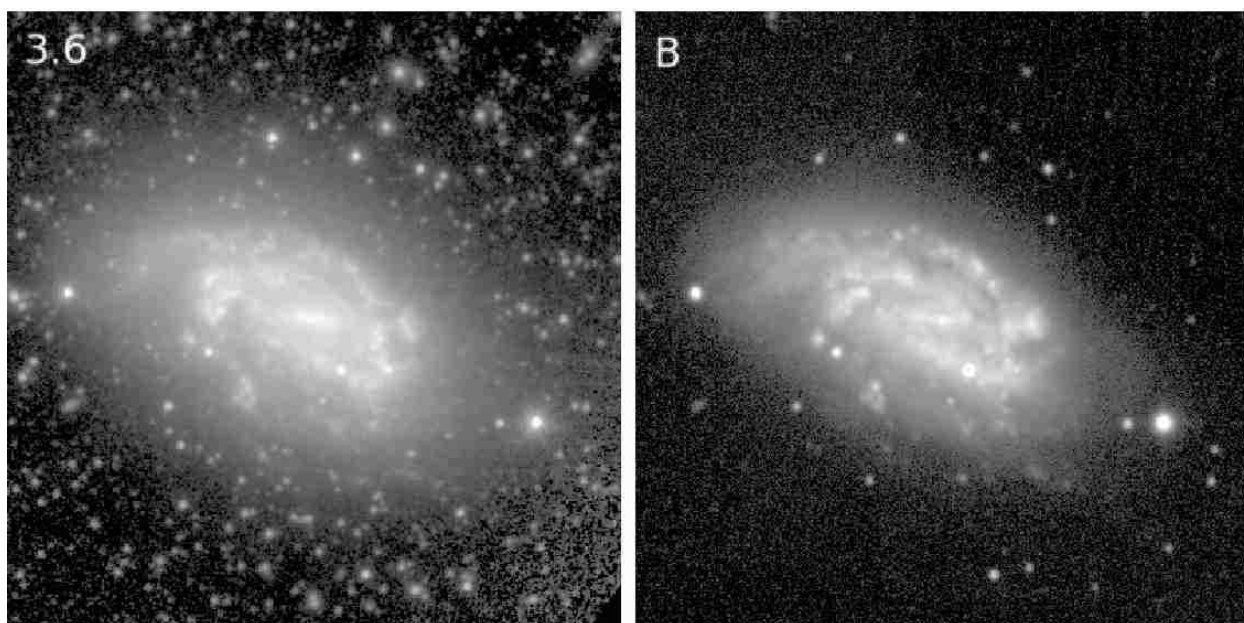


Fig. 42.— Comparison of IRAC $3.6\mu\text{m}$ image of NGC 1559 (left) with a ground-based B -band image of the same galaxy at right. Note the significant correspondence of features between the two very different wavelength domains in this case.

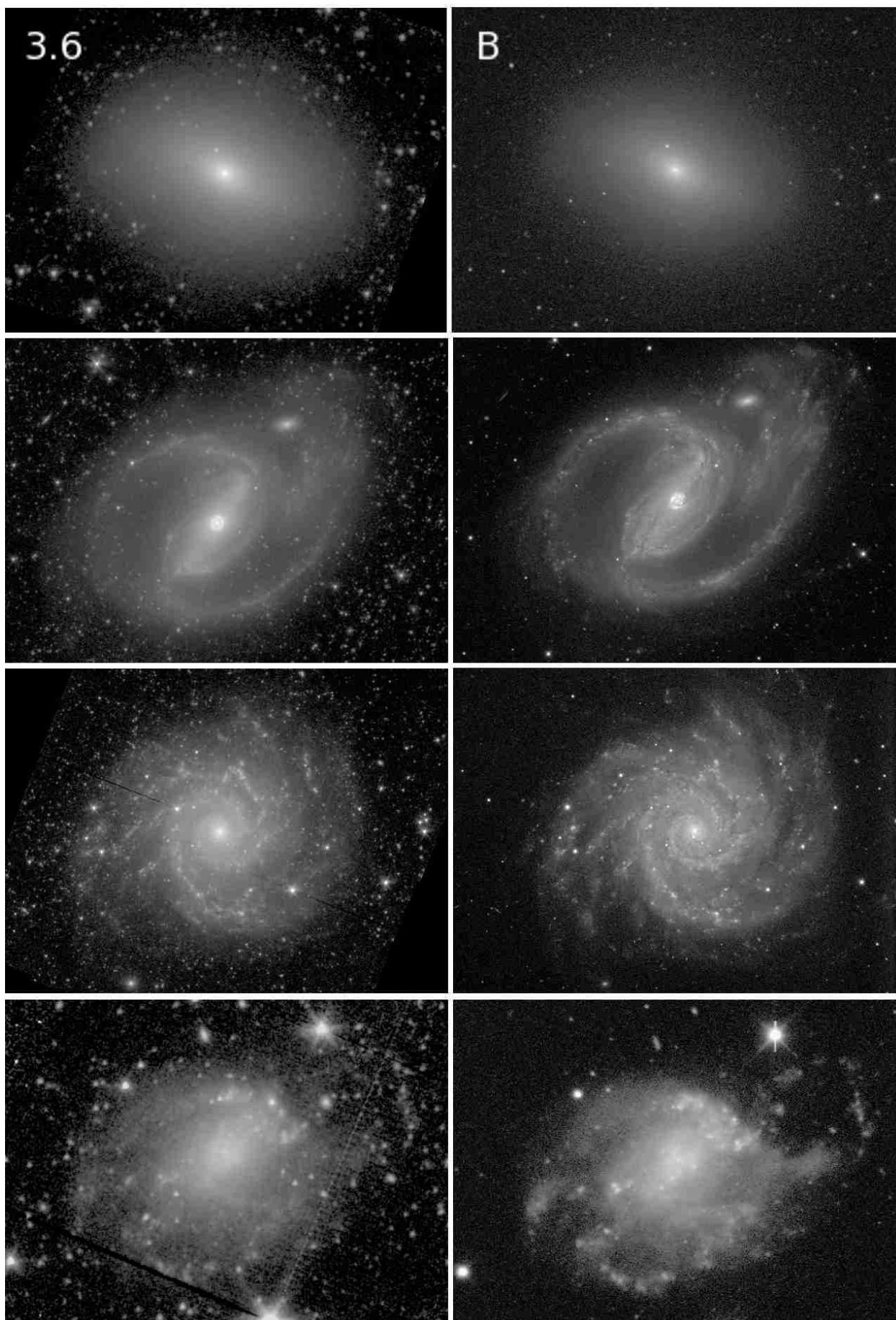


Fig. 43.— Comparison of IRAC $3.6\mu\text{m}$ images (left frames) with ground-based B -band images for (top to bottom): NGC 584, 1097, 628, and 428.

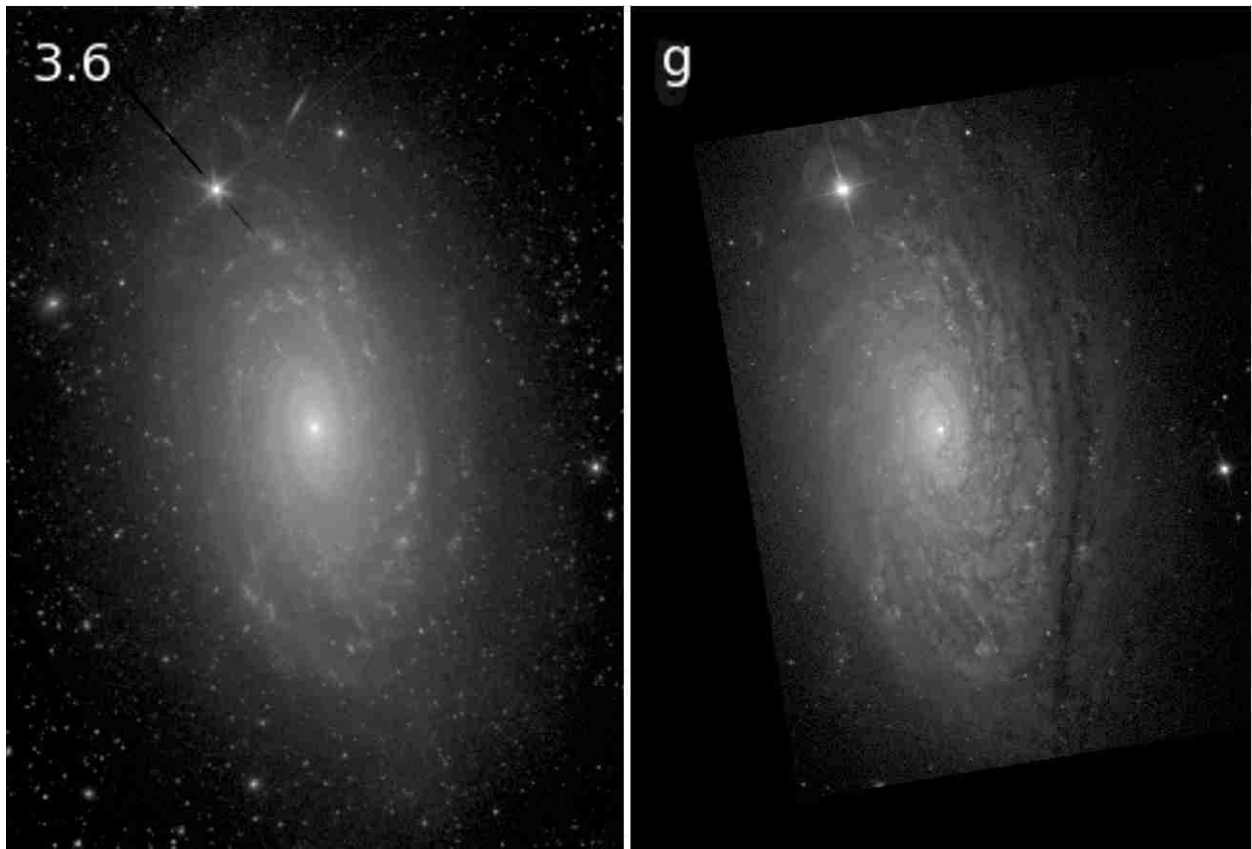


Fig. 44.— Comparison of IRAC $3.6\mu\text{m}$ and SDSS g -band images of the flocculent spiral galaxy NGC 5055.

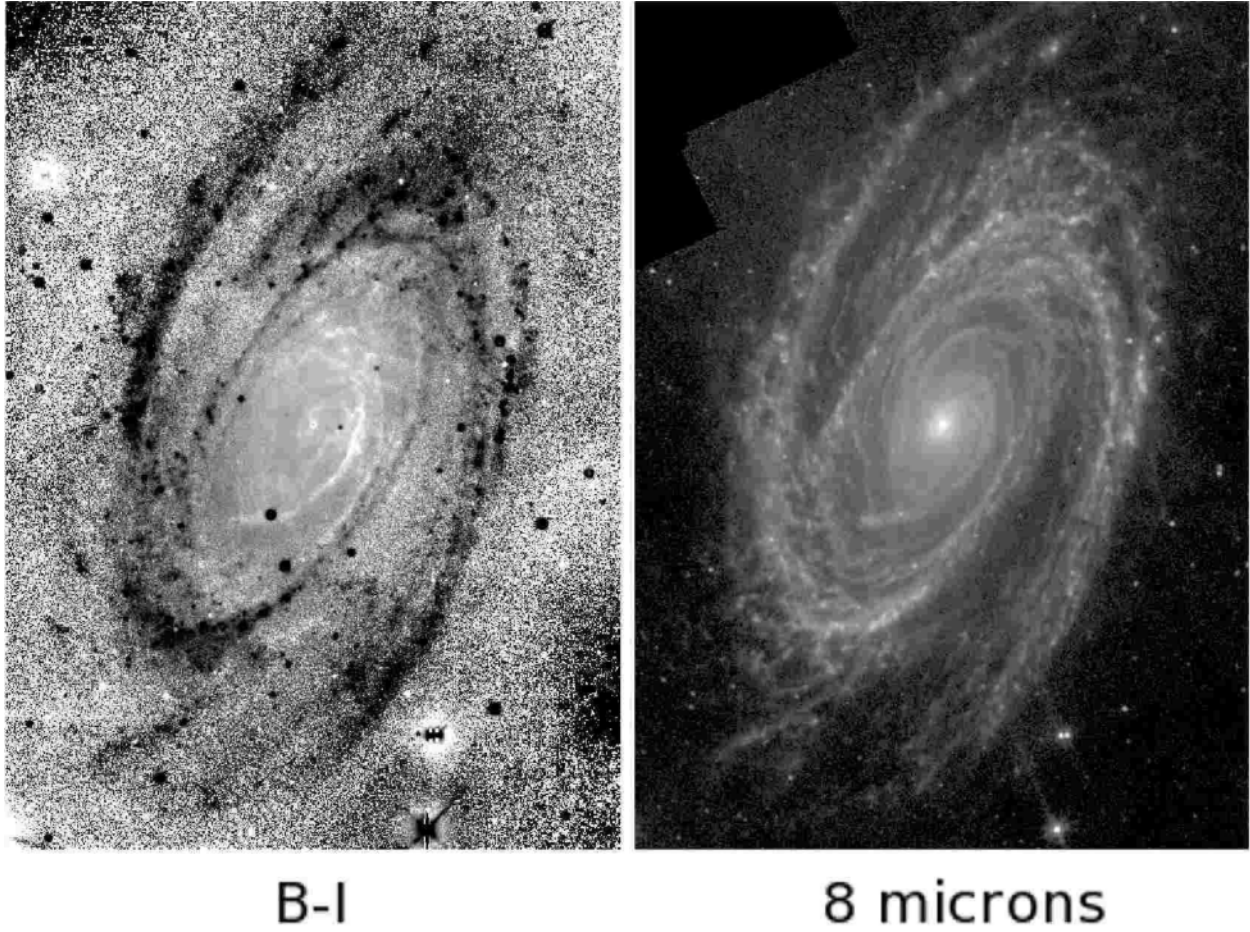


Fig. 45.— A comparison between a $B - I$ color index map and an $8\mu\text{m}$ dust emission map of the nearby spiral galaxy M81.

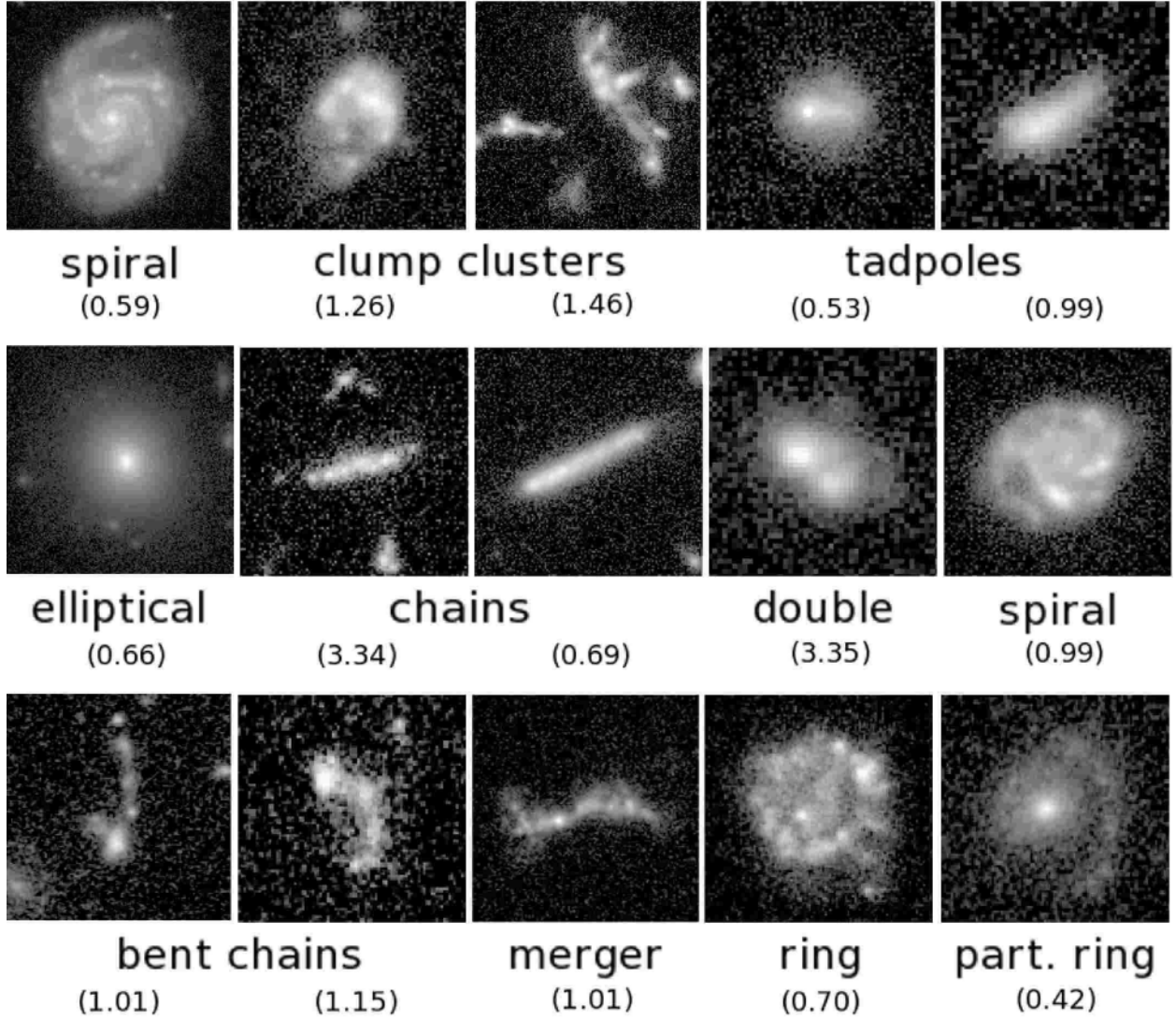


Fig. 46.— Intermediate to high redshift galaxy morphology (V and i -bands). The categories are due to EES04 and EE06. The number in parentheses below each frame is the redshift z of the galaxy shown.

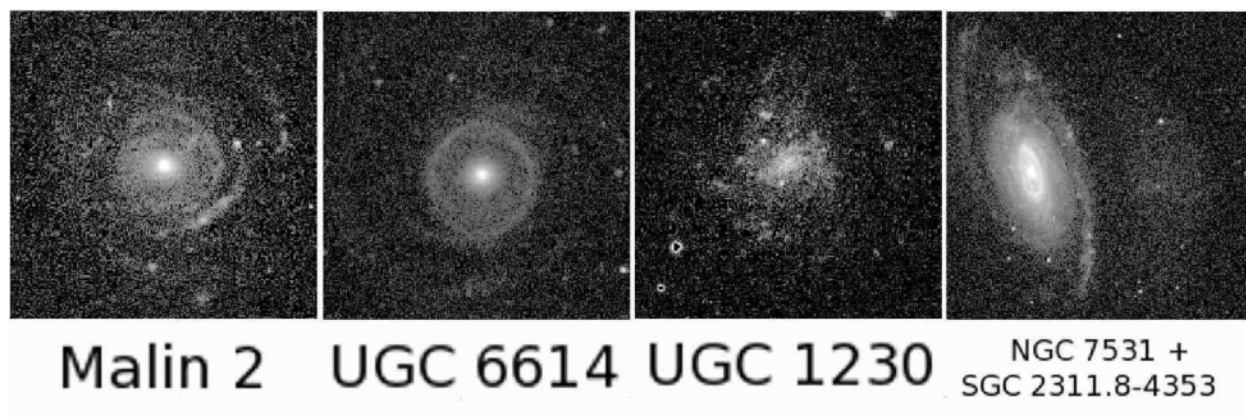


Fig. 47.— Examples of giant or large low surface brightness galaxies. In the far right panel, SGC 2311.8–4353 is the diffuse object to the right of high surface brightness spiral NGC 7531. All of these images are *B*-band.

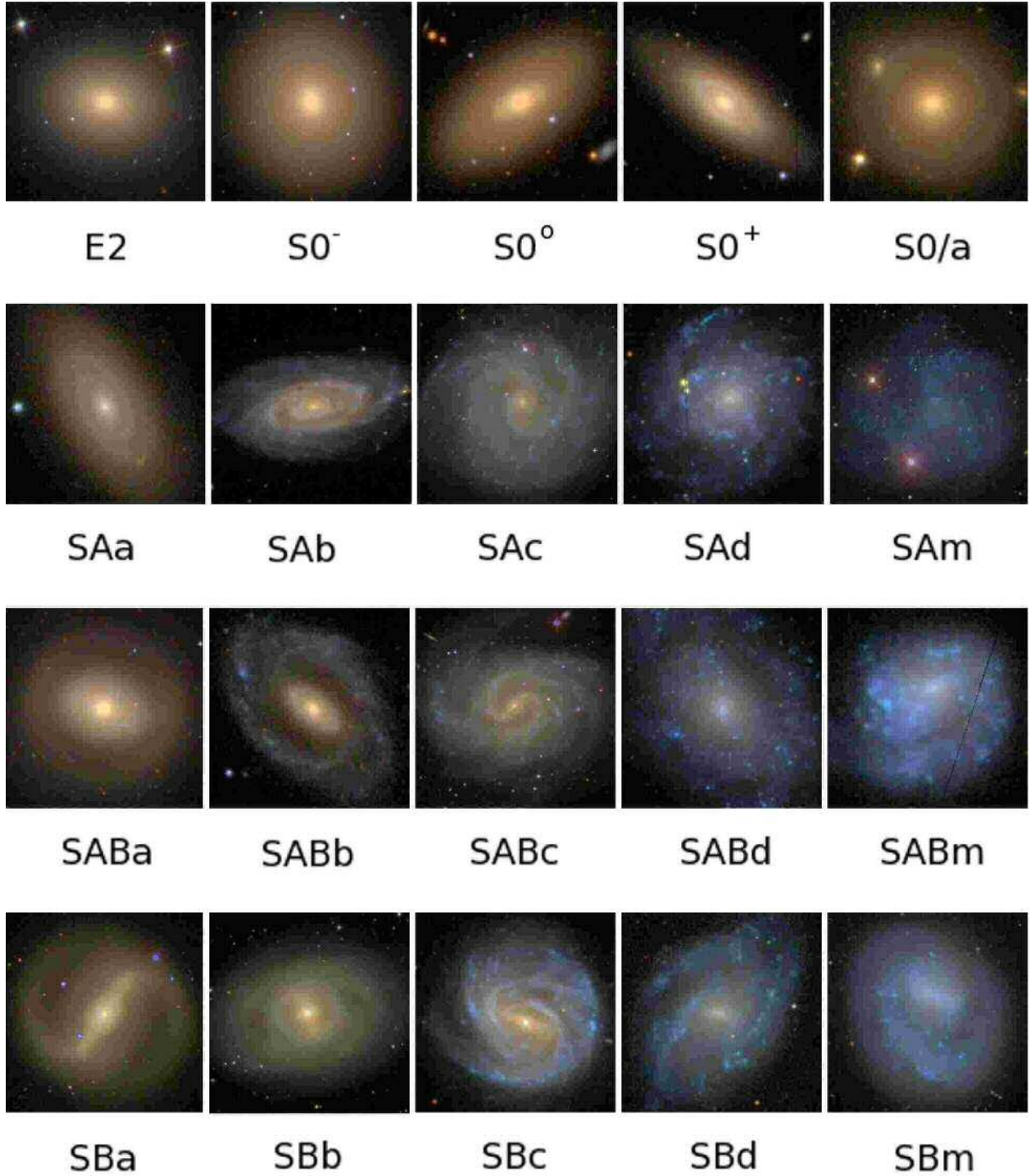


Fig. 48.— The Hubble tuning fork of ellipticals, S0s, and spirals of different bar classifications are shown here using SDSS color images. The galaxies are (left to right): Row 1 - NGC 3608, 4203, 6278, 4324, and 932. Row 2 - NGC 4305, 5351, 3184, 5668, and IC 4182. Row 3 - NGC 4457, 5409, 4535, 5585, and 3445. Row 4 - NGC 4314, 3351, 3367, 4519, and 4618.

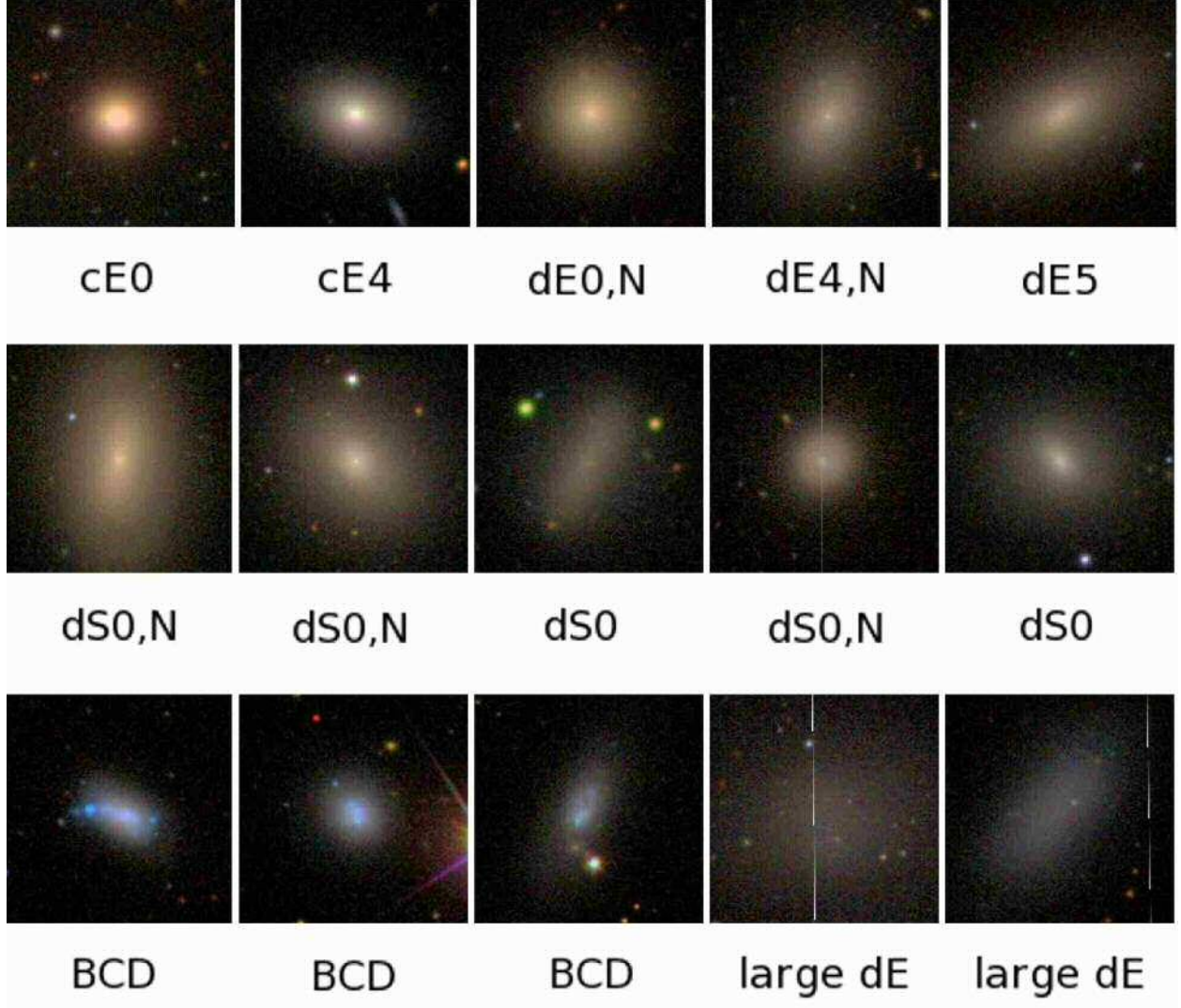


Fig. 49.— Examples of dwarf galaxies in the Virgo Cluster, drawn from the catalogue of Binggeli, Sandage, & Tammann (1985) and highlighted using SDSS color images. The classifications are from the BST catalogue and the galaxies are (left to right): Row 1 - NGC 4486B, IC 767, IC 3470, IC 3735, and UGC 7436. Row 2 - NGC 4431, IC 781, IC 3292, VCC 278, IC 3586. Row 3 - VCC 459, VCC 2033, VCC 841, IC 3475, and IC 3647.

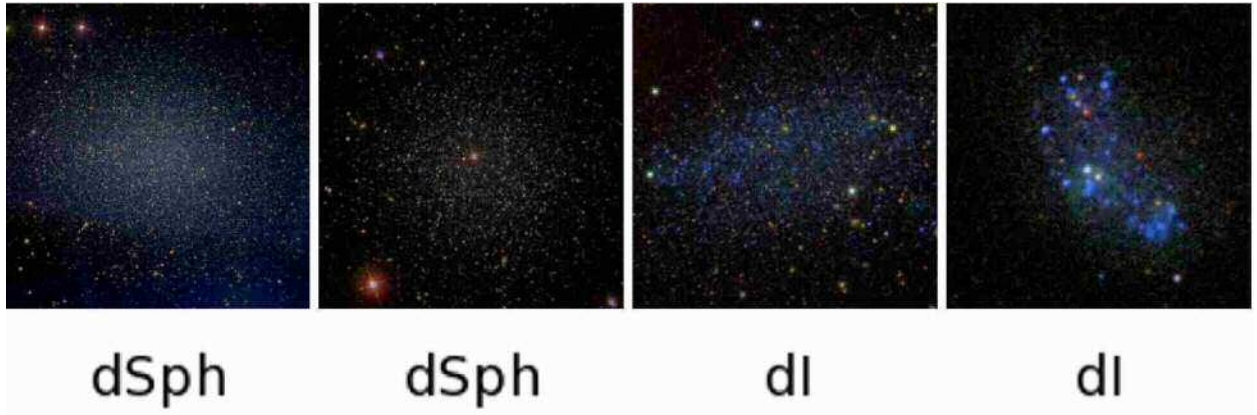


Fig. 50.— Four Local Group dwarfs having $M_V > -12$ (left to right): Leo I, Leo II, Leo A, and DDO 155 (all SDSS color images)

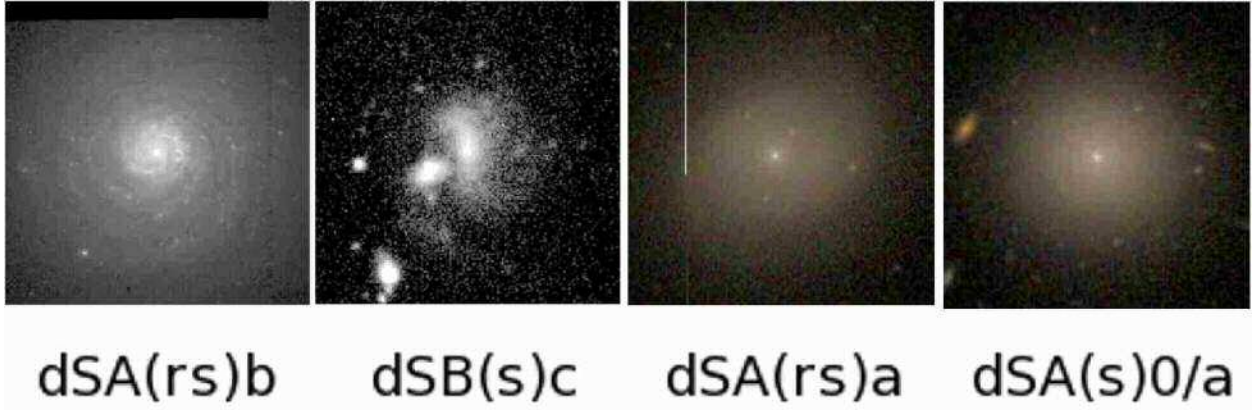


Fig. 51.— Four dwarf spiral galaxies (left to right): NGC 3928, D563–4, IC 783, and IC 3328

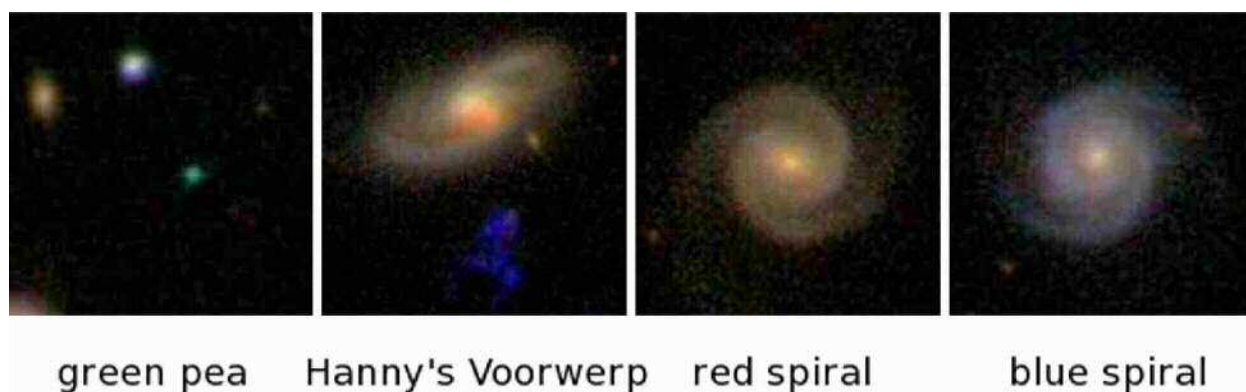


Fig. 52.— Interesting morphologies and color characteristics found by the Galaxy Zoo project team participants. A “green pea” is a star-like galaxy with a high flux in [OIII] 5007. “Hanny’s Voorwerp” is a cloud of ionized gas that may be the light echo of a quasar outburst in the nucleus of nearby IC 2497. Red spirals are morphologically similar to blue spirals, but have a lower star formation rate. (All SDSS color images)

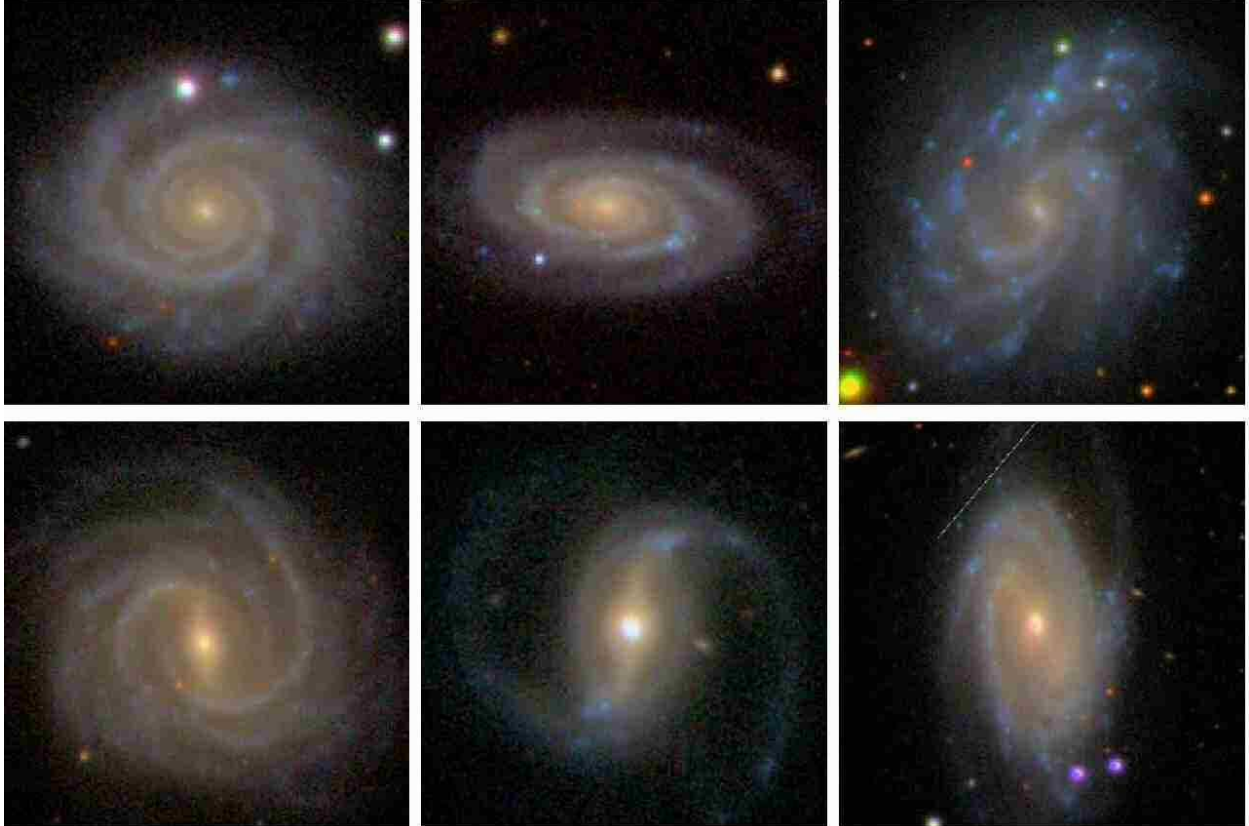
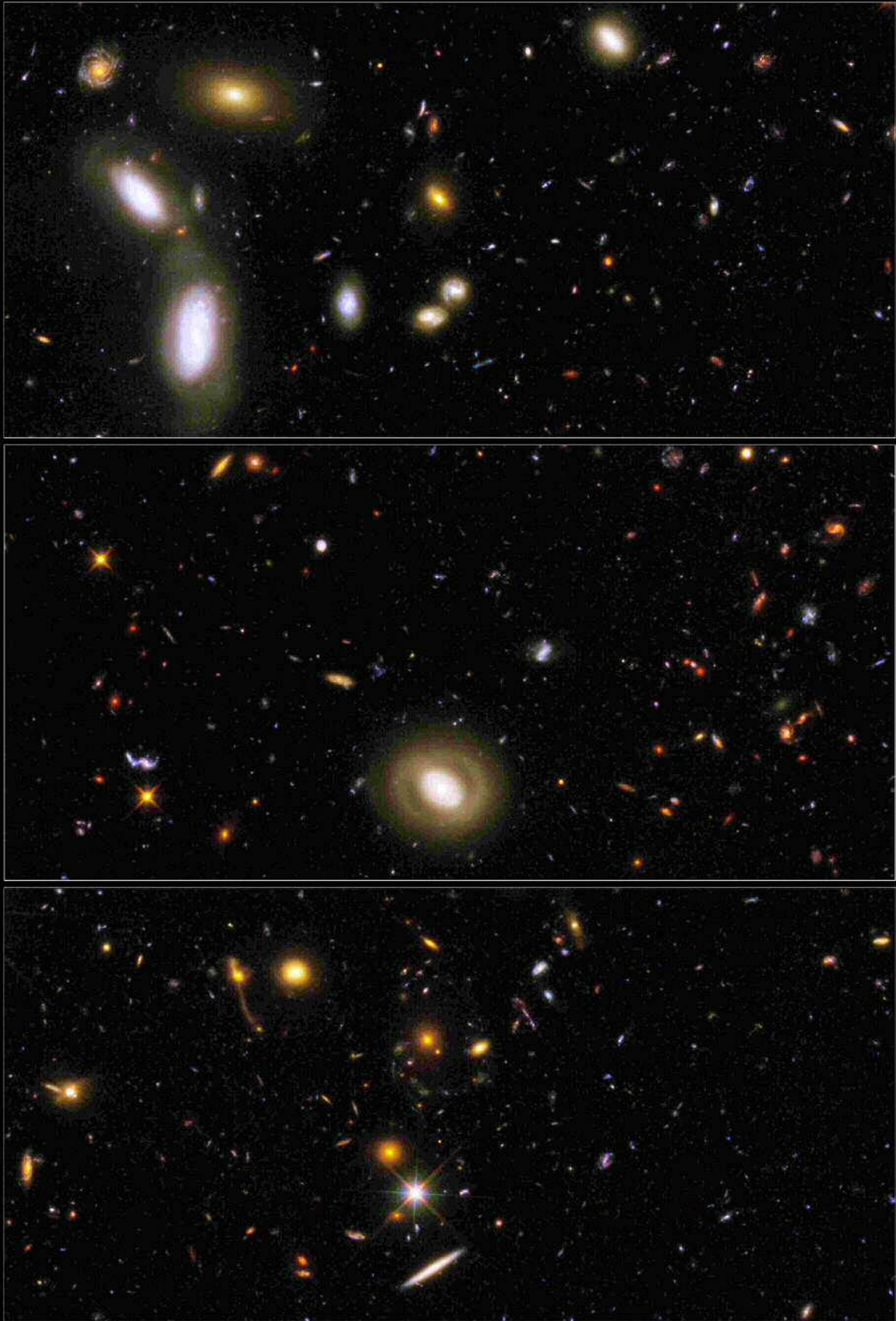


Fig. 53.— SDSS color images of six isolated Sb-Sc galaxies, both barred and nonbarred, from the AMIGA sample, a refined version of the Catalogue of Isolated Galaxies (Karachentseva 1973). The galaxies are (left to right): Row 1: NGC 2649, 5622, and 5584; Row 2: NGC 4662, 4719, and 2712.



NASA, ESA, R. Windhorst (Arizona State University),
P. McCarthy (Carnegie Institution of Washington),
R. O'Connell (University of Virginia), and the WFC3 Science Oversight Committee

STScI-PRC10-01b

Fig. 54.—

Fig. 54. (cont.).— Three subsections from the WFC3-ERS survey of the GOODS-south field (Windhorst et al. 2010). The colors are based on images obtained with 10 filters ranging from $0.2\mu\text{m}$ to $2\mu\text{m}$.