

Fernanda Vitória Roman de Oliveira

**Galáxias *Jellyfish* no sistema multi-aglomerado
Abell901/2 com o OMEGA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Física da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul como requisito parcial
para a obtenção do grau de bacharel em Física
- ênfase em Astrofísica.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Instituto de Física

Orientador: Prof. Dr. Ana Leonor Chies Santiago Santos

Porto Alegre

2017

Fernanda Vitória Roman de Oliveira

**Galáxias *Jellyfish* no sistema multi-aglomerado
Abell901/2 com o OMEGA**

Porto Alegre

2017

Agradecimentos

Agradecer a todos que contribuíram de alguma forma para esse trabalho chega a ser de uma dificuldade tão grande quanto foi escrevê-lo.

Eu não poderia deixar de agradecer ao constante estímulo que a Ana sempre me providenciou e também a toda admiração que ela me inspira. Assim como não poderia deixar de citar o Bruno que, mesmo de longe, foi vital para que esse trabalho fosse concluído, ao Alfonso pela grande experiência e a todo o time do OMEGA pelo acolhimento, aprendizado e incentivo.

Nada disso seria possível se eu não tivesse pais maravilhosos que me apoiaram e me estimularam a seguir um sonho que a cada dia estou um pouquinho mais perto de realizar.

Obrigada a todos os amigos, familiares e colegas que fizeram desses 4 anos uma experiência marcante.

Resumo

A evolução das galáxias está fortemente correlacionada com o ambiente em que elas habitam. Em ambientes densos, a interação entre o meio interestelar e o meio intra-aglomerado pode resultar na remoção do gás frio da galáxia na forma de rastros de detritos e pontos de formação estelar. Um mecanismo físico importante envolvido nesse processo é conhecido como *ram-pressure stripping* e pode alterar completamente as propriedades físicas e morfologia da galáxia. Em casos extremos, conforme a galáxia cai em um ambiente mais denso, ela pode formar "tentáculos" de detritos de modo a lembrar uma água-viva. Nós apresentamos uma busca sistemática por candidatas à galáxias *jellyfish* no sistema multi-aglomerado Abell 901/2. Com o levantamento de dados OMEGA, 3 colaboradores inspecionaram visualmente mais de 400 galáxias com emissão em $H\alpha$ e encontramos uma amostra final de 46 candidatas fortes a galáxias *jellyfish* (JClass maior ou igual a 3). Essa amostra consiste de 39 galáxias com formação estelar e 5 AGNs, todas estão na sequência *blue-cloud* com exceção de duas galáxias *dusty-red*. As galáxias foram previamente classificadas como espirais *late-type* e irregulares. Elas se mostram um pouco mais massivas do que as outras galáxias devido a um viés na seleção visual. Como parte de uma segunda inspeção visual, atribuímos *trail vectors* para cada galáxia com o qual tentamos determinar a direção em que essas galáxias estão caindo no sistema. Analisando as propriedades de formação estelar em comparação com as outras galáxias com formação estelar no mesmo sistema, observamos que elas mostram uma taxa de formação estelar específica mais alta. Algumas delas possuem uma emissão de $H\alpha$ espacialmente perturbada e estendida. Os contornos dessa emissão espacial mostram relação com os *trail vectors* para aproximadamente metade da amostra, nas quais vemos que a formação estelar parece estar localizada na parte frontal do movimento da galáxia. Quanto ao ambiente, elas não aparentam seguir nenhuma distribuição diferente em distância radial ao subcentro mais próximo nem em densidade do ambiente de matéria estelar quando comparadas com as outras galáxias da amostra OMEGA. Além disso, quando considerados os *trail vectors* na distribuição espacial, vemos que as galáxias não mostram uma tendência em movimentarem-se em direção convergente ou divergente em relação a nenhum dos subcentros do sistema. Estudando o diagrama de espaço de fase considerando a atividade AGN, parece que as galáxias *jellyfish* candidatas que hospedam um AGN não parecem ter tido a atividade desencadeada pelo fenômeno de *ram-pressure stripping*.

Palavras-chaves: galáxias: evolução; galáxias: aglomerados: geral; galáxias: aglomerados: meio intra-aglomerado; galáxias: formação estelar.

Abstract

The evolution of galaxies is strongly correlated with the environment they inhabit. In denser environments, the interaction between the interstellar medium and the intracluster medium can result in the removal of cold gas of the galaxy in the shape of debris trails and star formation knots. A major physical mechanism involved in this process is known as ram-pressure stripping and it can completely alter the galaxies' physical properties and morphology. In extreme cases, as the galaxy falls into a denser environment, it can begin to form debris tails resembling a jellyfish. We present a systematic search for jellyfish galaxy candidates in the Abell 901/2 multi-cluster system. With the OMEGA survey, we have visually inspected more than 400 galaxies that show $H\alpha$ emission and found a final sample of 46 jellyfish candidates. This sample consists of 39 star forming galaxies and 5 AGNs, all of which are in the blue-cloud sequence besides two dusty-red galaxies. They had been previously morphologically classified as late-type spirals and irregulars galaxies and shown to be slightly more massive than the other galaxies in the system. This is likely due to a bias in the visual selection. As part of a second round of visual inspection, we assigned "trail" vectors to each galaxy from which we try to determine the direction in which these galaxies are falling into the system. Analysing their star formation properties in comparison to the other star forming galaxies in the same system we observe that they show higher specific star formation rate than the other non-jellyfish star forming galaxies. Some of them also have very disturbed and extended spatial $H\alpha$ emission. The contours of this spatial emission show some relation to the trail vectors for approximately half of the sample in which the star formation seems to be located in the frontal part of the galaxy's movement. As far as the environment is concerned, the galaxies do not seem to have a different distribution of radial distances to their respective closest subcentre when compared to the other galaxies on the OMEGA sample. They also do not show a different distribution from the other galaxies with respect to the stellar mass density environment they inhabit. Furthermore, when considering the trail vector in their spatial distribution we see that the galaxies have no clear tendency to be falling towards or outwards from any of the system's subcentres. When looking at the phase space diagram analysed the AGN activity, it seems that the *jellyfish* galaxy candidates hosting AGN do not seem to have had this activity triggered by the ram-pressure stripping event.

Key-words: galaxies: evolution; galaxies: clusters: general; galaxies: clusters: intracluster medium; galaxies: star formation.

As abreviações e acrônimos a seguir são usados ao longo dessa monografia:

OMEGA - OSIRIS Mapping of Emission-line Galaxies in A901/2

STAGES - the Space Telescope A901/2 Galaxy Evolution Survey

GASP - GAs Stripping Phenomena in galaxies with MUSE

AGN - Active Galactic Nucleus

SFR - Star Formation Rate

sSFR - specific Star Formation Rate

LiNER - Low-ionization Nuclear Emission-line Region

A901/2 - Abell 901/2

Sumário

	Notation	4
	Lista de ilustrações	
	Lista de tabelas	
1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Evolução de Galáxias	2
1.1.1	Mecanismos de Condução da Evolução	4
1.2	Galáxias <i>Jellyfish</i>	6
1.3	Sistema Abell 901/2 e o levantamento de dados OMEGA	7
1.4	Estrutura do trabalho	9
2	DADOS	10
2.1	OMEGA	10
2.2	Outros dados disponíveis para o sistema Abell901/2	11
3	AMOSTRA	12
3.1	Seleção da Amostra	12
4	ANÁLISE	14
4.1	Características da Amostra	14
4.1.1	Morfologia	15
4.1.2	Massa	16
4.1.3	Outras características	17
4.2	<i>Trail Vectors</i>	18
5	RESULTADOS	20
5.1	Propriedades da Formação Estelar	20
5.1.1	Emissão do $H\alpha$	22
5.2	Propriedades do Ambiente	24
5.2.1	Distribuição Espacial dos Eventos de <i>Ram-pressure Stripping</i>	26
5.3	Diagrama do Espaço de Fase e atividade nuclear	31
6	SUMÁRIO E CONCLUSÕES	34
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS	36

Referências

8

APÊNDICE I

Lista de ilustrações

Figura 1.0.1–M87 e o aglomerado de Virgem	1
Figura 1.0.3–Sequência de Hubble	2
Figura 1.0.2–Diagrama cor-magnitude para galáxias	2
Figura 1.1.1–Relação Morfologia-densidade	3
Figura 1.1.2–Fusão de Galáxias	4
Figura 1.1.3–Galáxia <i>Cartwheel</i>	5
Figura 1.2.1–ESO 137-001: Galáxia <i>Jellyfish</i>	7
Figura 1.3.1–Abell901/2	8
Figura 2.1.1–GranTeCan	10
Figura 2.1.2–Espectro OMEGA	11
Figura 4.1.1–Gráfico: Diagram WHAN	15
Figura 4.1.2–Gráfico: Distribuição das Morfologias	16
Figura 4.1.3–Gráfico: Distribuição das Massas	17
Figura 4.2.1–Exemplo Trail Vector	18
Figura 5.1.1–Gráfico: Taxa de Formação Estelar Específica <i>versus</i> massa	21
Figura 5.1.2–Histograma cumulativo da diferença entre taxas de formação estelar específica.	22
Figura 5.1.3–Contornos da emissão em $H\alpha$	23
Figura 5.2.1–Histograma cumulativo da distribuição das galáxias por densidade de matéria estelar.	25
Figura 5.2.2–Histogramas cumulativos das distâncias radiais.	26
Figura 5.2.3–Distribuição espacial dos eventos de <i>ram-pressure stripping</i>	27
Figura 5.2.4–Mapa de contornos da matéria escura analisada por técnicas de <i>weak-</i> <i>lensing</i> sobre a emissão luminosa do sistema A901/2 (Heymans et al., 2008).	29
Figura 5.2.5–Distribuição espacial dos eventos mais evidentes de <i>ram-pressure stripping</i>	30
Figura 5.3.1–Diagrama de Espaço de Fase	32

Lista de tabelas

Tabela 1 – Concordância entre contornos $H\alpha$ e <i>trail vector</i>	24
Tabela 2 – Coordenadas e velocidades σ dos subcentros do sistema A901/2	24
Tabela 3 – Distribuição espacial das galáxias por direção do movimento	28
Tabela 4 – Número de galáxias <i>jellyfish</i> e de galáxias com formação estelar por aglomerado.	28

1 Introdução

O Universo que vivemos hoje é muito diferente do universo que deu origem a todas as estruturas que observamos agora (Ryden, 2014). O modelo mais aceito hoje descreve um universo que surgiu há aproximadamente 13,8 bilhões de anos (Planck Collaboration et al., 2016) a partir de uma singularidade que começou a se expandir e distribuir toda a matéria e energia existente em um espaço cada vez maior. Conforme o tempo passou, cada vez mais a densidade caiu, permitindo que estruturas mais complexas pudessem existir.



Figura 1.0.1 – A figura mostra a galáxia M87, uma elíptica supergigante, localizada no centro do aglomerado de Virgem, a cerca de 17 Mpc.

As estruturas foram se formando a partir do colapso gravitacional de matéria nos locais de sobredensidade. Esses pontos provavelmente deram origem ao que hoje conhecemos como as grandes galáxias elípticas que permanecem nos centros de grandes aglomerados de galáxias, como a galáxia M87 no aglomerado de virgem mostrado na figura 1.0.1.

Ao contrário da galáxia M87, a maior parte das galáxias não são elípticas massivas. Há uma grande diversidade de morfologias nesses sistemas e além de morfologias diferentes, há também uma bimodalidade em cor nas galáxias, sugerindo uma diversidade também de populações estelares.

Na imagem 1.0.2 podemos ver essa bimodalidade em cor representada no diagrama cor-magnitude para galáxias. A maior parte das galáxias tende a se agrupar em dois grupos: uma nuvem azul (*blue-cloud*), sugerindo uma formação estelar ativa, e uma sequência

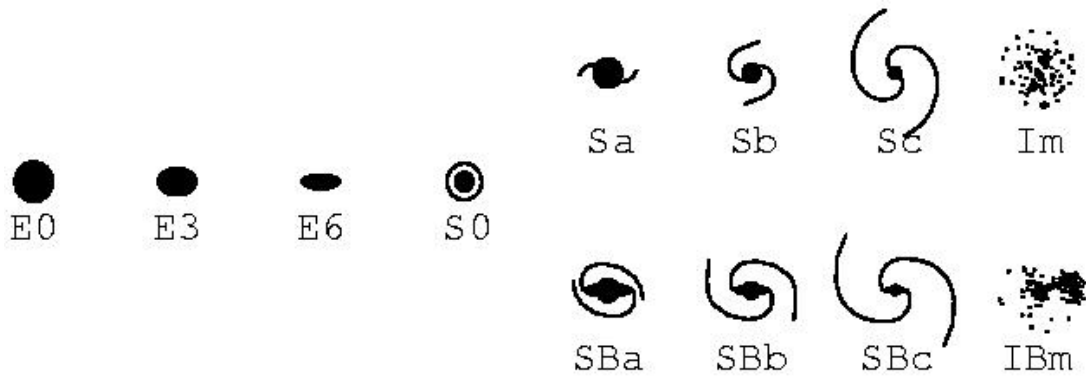


Figura 1.0.3 – Sequência de Hubble: primeira tentativa de sequência evolutiva dos tipos morfológicos.

vermelha (*red sequence*), uma sequência onde a formação estelar cessou há muito tempo (Bell et al., 2004). Entre essas duas regiões há também o chamado vale verde (*green valley*) que, dado o pequeno número de galáxias, acredita-se que seja uma zona de transição breve entre as regiões azul e vermelha.

Essa diversidade nas propriedades das galáxias pode ser observada também na sua morfologia.

Em 1926, Hubble distribuiu as galáxias observadas até então em grupos morfológicos semelhantes e tentou, pela primeira vez, atribuir uma sequência evolutiva a elas. Na imagem 1.0.3 pode-se ver que as galáxias foram ordenadas em galáxias *early-type* (mais elípticas) e *late-type* (mais espirais ou irregulares).

1.1 Evolução de Galáxias

A expansão do universo possibilitou que o gás existente pudesse esfriar e, posteriormente, colapsar em sua própria gravidade formando estrelas. A maioria das estruturas complexas, como galáxias, começaram a se formar nessa época de maneira hierárquica: estruturas menores se juntavam formando estruturas maiores. A existência de diversos tipos morfológicos de galáxias levanta várias questões acerca de sua formação e evolução. Vários mecanismos de evolução foram propostos, e também diferentes teorias de formação, para explicar porque observamos diferentes características na morfologia, cor e população das galáxias (Carroll & Ostlie, Carroll & Ostlie).

Além disso, há evidências de que a proporção dessas morfologias também não está

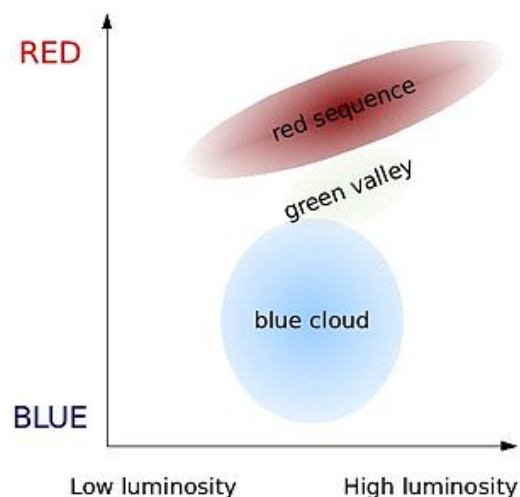


Figura 1.0.2 – Diagrama cor-magnitude para galáxias: bimodalidade de cor e sequências de evolução.

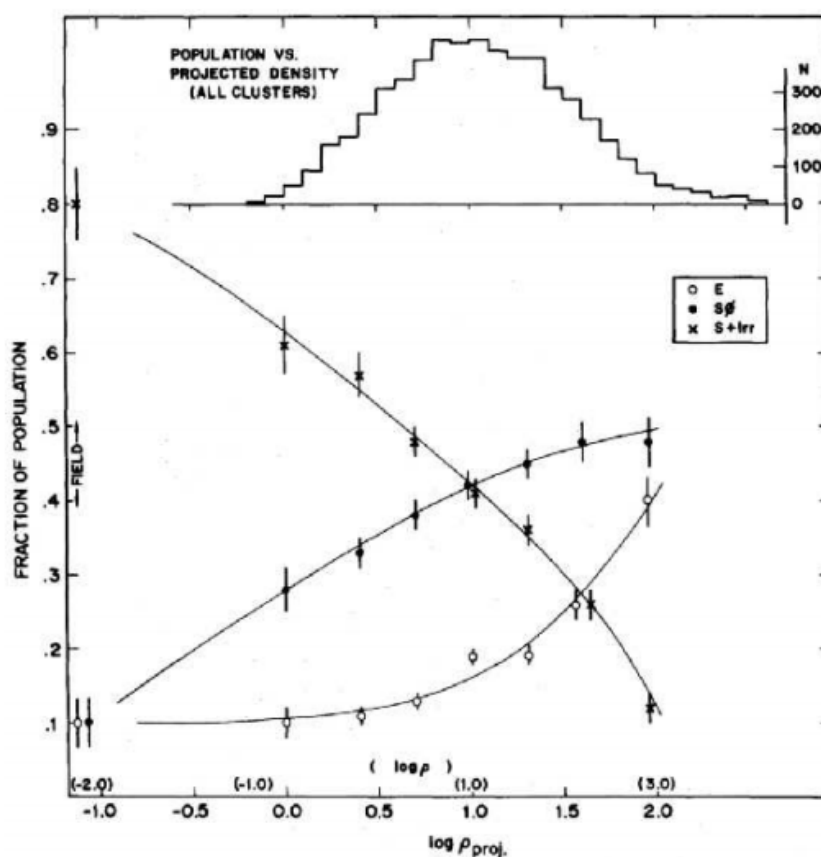


Figura 1.1.1 – Relação morfologia-densidade, Dressler (1980).

uniformemente distribuída no universo. Observa-se que as morfologias *early-type* (galáxias elípticas ou lenticulares) estão concentradas mais em ambientes densos enquanto galáxias *late-type* (espirais ou irregulares) estão proporcionalmente mais presentes em ambientes poucos densos. Essa propriedade é conhecida como a relação morfologia-densidade (Dressler, 1980). A figura 1.1.1 mostra essa variação na morfologia dominante de acordo com a densidade do ambiente. Onde mostra o fato de que ambientes mais densos são mais propensos a hospedar galáxias *early-type*. Porém, essas proporções não se mantêm constantes durante o tempo cósmico do universo. Para *redshifts* a partir de $z \sim 0.5$, percebemos que a quantidade de galáxias S0s cresce enquanto ocorre o contrário para galáxias espirais conforme nos aproximamos de $z \sim 0$, ao passo que as galáxias elípticas se mantiveram em uma proporção aproximadamente constante (Dressler et al., 1997; Fasano et al., 2000). Isso suporta as evidências achadas de que transformações morfológicas em galáxias espirais podem levá-las a se transformarem em galáxias lenticulares (Bekki et al., 2002; Aragón-Salamanca et al., 2006).

Uma grande consequência da transformação de galáxias *late-type* em *early-type* é a atenuação da formação estelar desses sistemas, tornando-os mais passivos.

1.1.1 Mecanismos de Condução da Evolução

A evolução das galáxias é consequência de todos os mecanismos ou propriedades físicas internas: como a massa estelar da galáxias (Haines et al., 2006), e *feedback* de supernovas e AGN (Newton & Kay, 2013); e também da interação com o ambiente externo: como por *ram-pressure stripping* (Gunn & Gott, 1972), *mergers* (Barnes, 1992), efeitos de maré (Bekki, 1999) ou *harassment* (Moore et al., 1996). Esse problema, natureza *versus* meio ambiente, é uma das grandes questões em aberto na evolução de galáxias, pois ainda não é bem compreendido a dominância e extensão de cada um desses processos envolvidos na formação e transformação das galáxias. Esses processos externos podem se dar tanto por interações entre as galáxias ou entre as galáxias e o ambiente ao seu redor. O objetivo dessa seção é entrar em mais detalhes sobre alguns desses principais mecanismos.

Mecanismos de interação entre galáxias

As interações entre as galáxias ocorrem quando duas galáxias, ou mais, interagem entre si gravitacionalmente. Essas interações ocorrem em qualquer ambiente já que dependem apenas da presença das galáxias, porém o tipo de interação varia de acordo com a velocidade relativa das galáxias que estão envolvidas.

Mergers

Galáxias se movimentam no espaço e, às vezes, colidem entre si. O encontro dessas galáxias eventualmente resulta em um único objeto e é uma interação mais provável de ocorrer em ambientes com um regime de velocidades mais baixas. Essas colisões geralmente são divididas em duas categorias: *mergers* maiores, conhecido como fusão, ou *mergers* menores, também conhecidos como canibalismo (Lambas et al., 2012).

Quando duas galáxias de massas equivalente se encontram no céu, o processo de fusão ocorre e a galáxia final se torna uma galáxia completamente diferente de suas progenitoras: pode engatilhar um processo de *starburst* (Carroll & Ostlie, Carroll & Ostlie) (que é um evento curto de alta taxa de formação estelar), alterar ou desencadear a atividade do buraco negro central (Hewlett et al., 2017). Na figura 1.1.2, podemos ver um exemplo de galáxias sofrendo esse processo de fusão. Já o processo de canibalização, *minor merger*, ocorre quando uma galáxia mas-



Figura 1.1.2 – Fusão das galáxias NGC 6050 e IC1179 (Hubble).

siva captura uma galáxia muito menor do que ela (até um décimo de sua massa). Esse encontro não modifica fortemente a morfologia da galáxia principal, mas pode agir como um gatilho na formação estelar modificando seu histórico de formação (Bournaud et al., 2007).

Acredita-se que o papel dos *mergers* na evolução de galáxias é essencial para explicar a transição de galáxias espirais em S0s (Bekki, 1998) e também a formação de galáxias elípticas (Schombert, 1987; Toomre, 1977), assim como as galáxias elípticas centrais em aglomerados (Burke & Collins, 2013).

Interações de Maré

Galáxias que estão interagindo de maneira lenta também podem experimentar a remoção de material em forma de caudas de maré (Moore et al., 1996). É possível ver algumas dessas estruturas na figura 1.1.2. Recentemente foi observado que essas estruturas podem dar origem a sistemas estelares compactos (Mullan et al., 2010) e também galáxias anãs (Alavi & Razmi, 2015).

Harassment

O *harassment* é o processo de interação entre duas galáxias que interagem de maneira intensa em um período muito curto de tempo.



Figura 1.1.3 – Galáxia *Cartwheel*: a morfologia de anel provavelmente foi formada pela passagem de uma das galáxias ao lado através de seu disco.

As galáxias não chegam a se fundir, mas causam alterações extremas na morfologia, podendo levar à formação das galáxias anéis, e também podendo truncar a formação estelar (Moore et al., 1996).

A figura 1.1.3 mostra a galáxia *Cartwheel*, ou galáxia da roda, após ter sofrido uma interação com uma das galáxias também mostradas na figura.

Mecanismos envolvendo fortes interações com gás

O estágio evolutivo da galáxia está fortemente correlacionado com a sua eficiência em converter o gás frio interno em estrelas. Qualquer fenômeno que possa alterar a disponibilidade ou a temperatura do gás na galáxia pode alterar seu histórico de formação estelar e, portanto, acelerar sua evolução. Além disso, galáxias que habitam ambientes densos podem sofrer interações com o meio-aglomerado que é composto por gás quente.

Evaporação térmica do gás

Galáxias massivas possuem um poço de potencial gravitacional fundo que pode acabar retendo o gás quente aquecido por supernovas. A acumulação de gás quente pode evaporar o gás molecular e portanto causar uma atenuação na formação estelar (Nipoti & Binney, 2007).

Ram-pressure stripping

Ram-pressure stripping, em tradução livre: remoção por pressão de arrasto, é um mecanismo ambiental que ocorre na interação da galáxia com o gás em que ela está submersa. Uma galáxia rica em gás, ao cair no centro de potencial de um aglomerado, sofre atrito hidrodinâmico com o gás (quente) intra-aglomerado ao seu redor. Isso resulta na remoção do gás interestelar em seu interior. Como é um fenômeno que resulta na retirada do gás frio da galáxia, ele provavelmente é um componente importante na atenuação da formação estelar. Além disso, por depender fortemente da presença de gás no meio intra-aglomerado, esse mecanismo é mais dominante em meios densos e pode ser útil na compreensão da evolução acelerada de galáxias nesse tipo de ambiente.

1.2 Galáxias *Jellyfish*

As galáxias *jellyfish* são os casos mais extremos de galáxias passando por um período de remoção do seu gás através do mecanismo de *ram-pressure stripping*. Apesar deste fenômeno ser bem conhecido desde os anos 70, apenas recentemente a comunidade científica tem voltado seu interesse para tentar entender a sua morfologia peculiar e suas propriedades físicas únicas.

Vários estudos foram conduzidos sobre galáxias com morfologias extremamente perturbadas e com indícios de remoção de gás procurando ligações entre essa morfologia de transição e a evolução de galáxias como um todo (Cortese et al., 2007; Bekki, 2009; Smith et al., 2010). Há menos de 5 anos a nomenclatura foi modificada para galáxias *jellyfish* (Ebeling et al., 2014; McPartland et al., 2016) e recentemente uma grande amostra foi selecionada visualmente em diversos ambientes (Poggianti et al., 2016) e estudada através

do survey GASP (*GA*s *Stripping* *Phenomena* in galaxies with *MUSE*) com o instrumento MUSE (Poggianti et al., 2017b; Bellhouse et al., 2017; Fritz et al., 2017; Gullieuszik et al., 2017).



Figura 1.2.1 – Imagem do Hubble da galáxia ESO 137-001, pertencente ao aglomerado Abell 3627, como exemplo de uma galáxia *jellyfish*.

Enquanto a galáxia cai no meio mais denso do aglomerado, o seu gás é removido na forma de "tentáculos" no sentido contrário do movimento. Isso gera o colapso de grandes nuvens de gás e a criação de novas regiões de formação estelar na região dos "tentáculos". Isso modifica completamente a estrutura e a aparência de uma galáxia de forma que em alguns casos a morfologia original passa a se assemelhar com uma água-viva (Ebeling et al., 2014), assim como na figura 1.2.1.

Galáxias *jellyfish* são essenciais para compreender melhor o mecanismo de *ram-pressure stripping* e o processo de repressão da formação estelar em galáxias em ambientes densos, pois após a fase *jellyfish* a galáxia pode perder a sua reserva de gás. Essas galáxias estão experienciando uma morfologia de transição, que pode elevar ou atenuar a taxa de formação estelar (Bekki, 2014; Roediger et al., 2014). Além disso, essas galáxias também já foram relacionadas com o desencadeamento da atividade do buraco negro central (Poggianti et al., 2017a).

1.3 Sistema Abell 901/2 e o levantamento de dados OMEGA

A presença de gás intra-aglomerado é essencial para acionar o mecanismo de *ram-pressure stripping*, dessa forma, acredita-se que galáxias *jellyfish* sejam mais comumente encontradas em ambientes densos como aglomerados ou grupos numerosos, apesar de

que já foram encontradas galáxias *jellyfish* em grupos menos numerosos. Nesse trabalho estudamos galáxias *jellyfish* candidatas no sistema Abell 901/2 (figura 1.3.1).

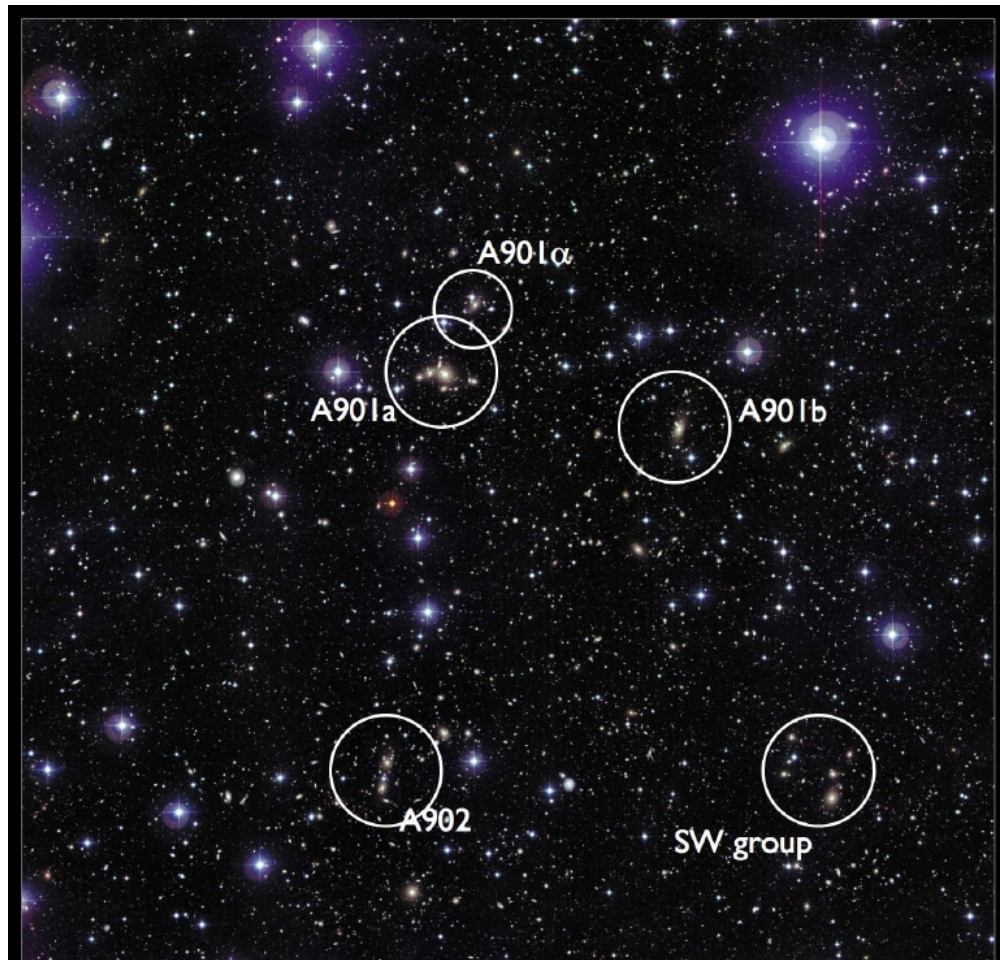


Figura 1.3.1 – Sistema multi-aglomerado Abell 901/2.

Abell 901/2 é um sistema multi-aglomerado composto por 3 aglomerados Abell (A901a, A901b e A902), mais grupos e filamentos relacionados (Gray et al., 2009). O sistema cobre cerca de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ do céu, está localizado a um *redshift* de $z \sim 0.165$ e é um laboratório ótimo para estudar a influência do ambiente na evolução das galáxias por possuir uma grande diversidade de densidades além de um grande número de objetos a serem estudados. Além disso, existem muitos outros estudos (Nicol et al., 2007; Heymans et al., 2008; Gray et al., 2009) com dados dos mais diversos sobre assuntos pertinentes à evolução de galáxias feitos no mesmo sistema e que auxiliam na compreensão e interpretação dos resultados.

O levantamento de dados OMEGA (Chies-Santos et al., 2015; Weinzirl et al., 2017; Rodríguez del Pino et al., 2017) se propôs a estudar essa população de galáxias. O OMEGA é um *survey* criado para analisar a emissão das linhas de $H\alpha$ e [NII] das galáxias do sistema A901/2. Esses dados foram coletados com o instrumento OSIRIS no telescópio GranTeCan.

1.4 Estrutura do trabalho

Nesse trabalho pretendemos estudar observacionalmente as propriedades físicas de galáxias com indícios morfológicos de remoção de gás por *ram-pressure stripping*. Para isso, foi selecionada uma amostra de galáxias *jellyfish* candidatas através de inspeção visual e, posteriormente, analisadas as suas propriedades de formação estelar, emissão das linhas H α e [NII], propriedades morfológicas e a distribuição e movimento nos diferentes ambientes do sistema.

Os objetivos principais desse trabalho são: entender onde e por que as galáxias sofrem a remoção de gás; como essa remoção afeta as suas propriedades de formação estelar imediata e atividade do AGN; e, por fim, como esse período de transição altera o caminho evolutivo das galáxias estudadas.

2 Dados

2.1 OMEGA

O OMEGA *survey* (OSIRIS Mapping of Emission-line Galaxies in A901/2) foi projetado para obter espectros de baixa resolução através do instrumento OSIRIS que contém uma tecnologia de tunable-filters com um interferômetro Fabry-Perot na faixa de emissão das linhas de $H\alpha$ e $[NII]$ para as galáxias do sistema A901/2.

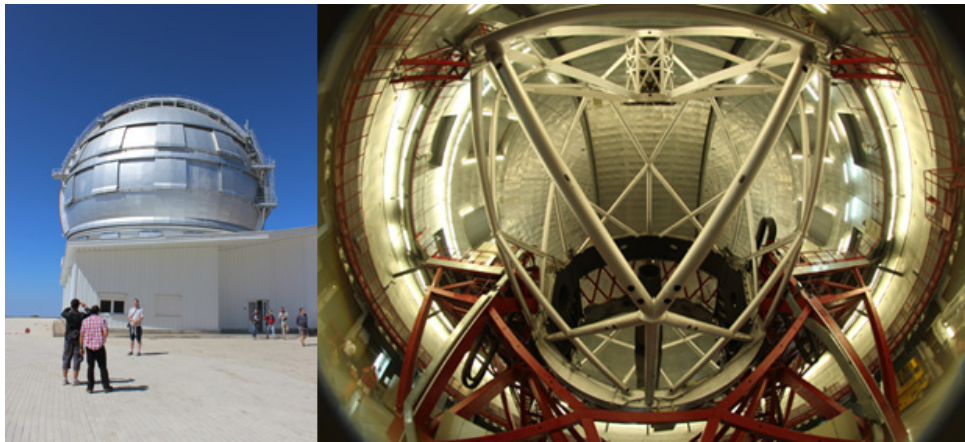


Figura 2.1.1 – GranTeCan: o maior telescópio do mundo onde o instrumento OSIRIS opera.

Os dados foram obtidos com o instrumento OSIRIS instalado no telescópio GranTeCan. O instrumento possui uma tecnologia de *tunable-filters* (constituído de um interferômetro Fabry-Perot de baixa resolução) que é capaz de obter imageamento de filtros de banda estreita tanto na região azul do espectro visível (λ 450 nm - 671 nm) quanto na do vermelho (λ 651 nm - 934.5 nm). O *survey* observou várias regiões do sistema com diversos filtros de banda estreita para assegurar que as linhas do $H\alpha$ e $[NII]$ fossem observadas para os membros do aglomerado no intervalo de *redshift* de $0.1594 \geq z \leq 0.1718$. Após a redução desses dados, foram produzidos e ajustados os espectros para cada galáxia localizada nos campos observados. Um exemplo de um desses espectros pode ser observado na figura 2.1.2 retirada de Chies-Santos et al. (2015). O painel esquerdo mostra os espectros total e nuclear produzidos para uma das galáxias da amostra. O painel direito mostra as regiões da galáxia que foram integradas para gerar os espectros do painel ao lado. Ao longo do trabalho utilizamos apenas os dados acerca da emissão na abertura total ao invés da abertura nuclear, pois focamos mais na atividade de formação estelar, que ocorre em toda a galáxia, do que na atividade AGN das galáxias, que ocorre no núcleo.

Todas as galáxias com uma emissão significativa em alguma das duas linhas de emissão constituem a amostra do OMEGA. As galáxias em emissão podem ser galáxias

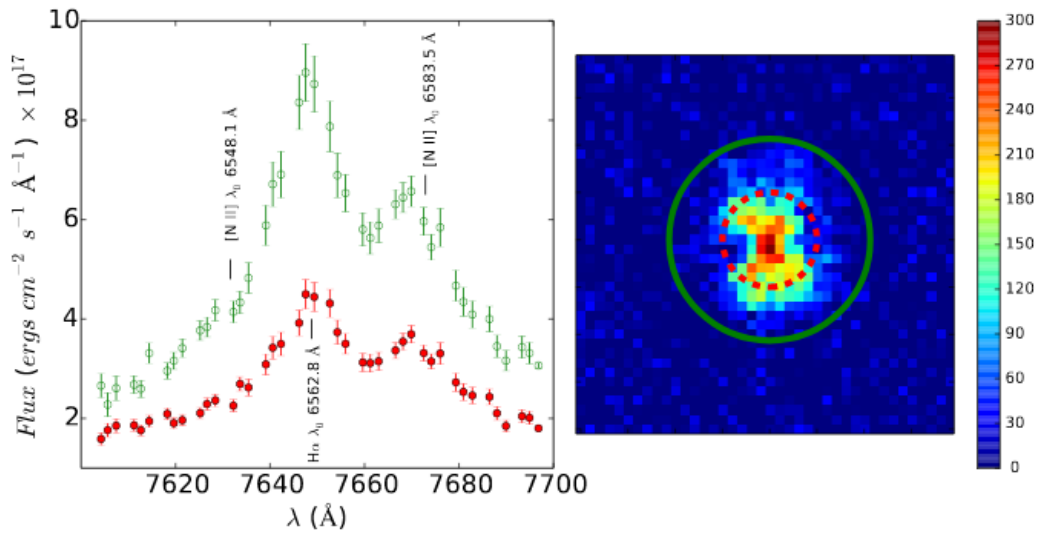


Figura 2.1.2 – Espectro exemplo do OMEGA para uma das galáxias da amostra (Chies-Santos et al., 2015).

AGN e/ou galáxias com formação estelar ativa e recente.

2.2 Outros dados disponíveis para o sistema Abell901/2

Vários outros estudos já foram dirigidos nesse mesmo sistema e há vários dados e catálogos à disposição para que outras questões científicas possam ser investigadas. O mais relevante para o nosso estudo, é o levantamento de dados STAGES (the Space Telescope A901/2 Galaxy Evolution Survey). Entre os dados disponíveis, utilizamos principalmente o catálogo do STAGES (Gray et al., 2009) com as informações de massa estelar, coordenadas espaciais, cores e morfologias. Também executamos a seleção da amostra através de inspeção visual nas imagens do Hubble (F606W HST/ACS) das galáxias do sistema.

3 Amostra

Nessa seção está descrito o método de seleção de uma sub-amostra de galáxias *jellyfish* candidatas através de evidências morfológicas de *ram-pressure stripping* nas galáxias da amostra OMEGA.

3.1 Seleção da Amostra

A amostra foi selecionada seguindo um método com base na inspeção visual das galáxias e que já foi utilizado e descrito na literatura por outros autores (Ebeling et al., 2014; Poggianti et al., 2016). O método consiste em procurar por indícios morfológicos de *ram-pressure stripping* utilizando principalmente três critérios:

- Uma morfologia perturbada de forma unilateral: indicando a presença de uma força externa e unilateral.
- Pontos brilhantes: indicando formação estelar intensa.
- Presença de uma cauda de detritos: que constitui os chamados "tentáculos" da galáxia *jellyfish*.

Para poder caracterizar melhor a confiabilidade da amostra, também utilizamos a categorização das galáxias selecionadas em grupos chamados JClass (Poggianti et al., 2016).

Esses grupos tem a função de classificar as galáxias candidatas em ordem de intensidade do fenômeno de *ram-pressure stripping*: as galáxias com indícios morfológicos mais evidentes são categorizadas como JClass 5 enquanto as galáxias que não apresentam indícios de remoção de gás são categorizadas como JClass 0.

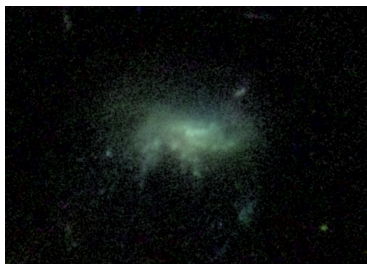
As figuras 3.1.1a, 3.1.1b e 3.1.1c mostram exemplos de galáxias candidatas classificadas como JClass 5, 4 e 3, respectivamente. Nesses três casos exemplo a presença dos ditos "tentáculos" é evidente, além de alguns pontos brilhantes visíveis que podem indicar regiões de formação estelar.

Essa seleção foi realizada em todas as 439 galáxias da amostra do OMEGA por três membros do grupo: Fernanda, Ana e Bruno. Cada membro realizou a inspeção visual individualmente em toda a amostra procurando pelos indícios morfológicos de *ram-pressure stripping* e atribuindo uma JClass.

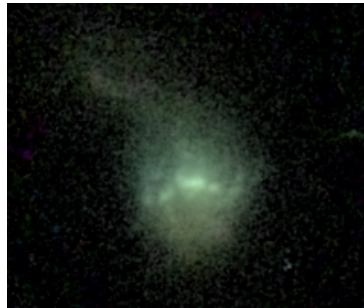
Após a finalização do processo de inspeção visual, a JClass final de cada galáxia foi considerada como a média simples (arredondada para baixo) das três JClasses atri-

buídas pelos inspetores. É importante chamar a atenção para o fato de que, como há o arredondamento para baixo, as galáxias *jellyfish* só atingem a JClass máxima se todos os três classificadores atribuíram JClass 5 para a mesma galáxia. As galáxias selecionadas como candidatas foram apenas as galáxias com JClass final maior ou igual a 3.

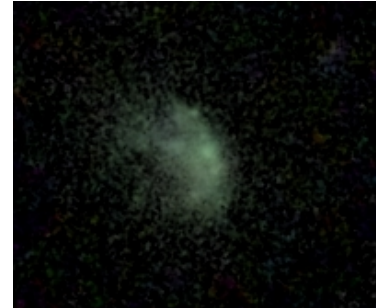
Em Poggianti et al. (2016) foi utilizada a JClass 3 como o ponto de corte da amostra, pois a partir dessa classe as galáxias apresentam as evidências visuais mais fortes constituindo então uma amostra mais robusta.



(a) ID: 45301 - JClass5.



(b) ID: 20056 - JClass4.



(c) ID: 55188 - JClass3.

4 Análise

4.1 Características da Amostra

A amostra final consiste de 46 galáxias candidatas, das quais:

- 4 galáxias JClass 5;
- 14 galáxias JClass 4;
- 28 galáxias JClass 3.

Além de mais 114 com evidências fracas de *ram-pressure stripping*, cujas JClasses finais foram 1 ou 2:

- 41 galáxias JClass 2;
- 73 galáxias JClass 1;

Com as informações dos fluxos das linhas de emissão de $H\alpha$ e $[NII]$ provindos do OMEGA, é possível verificar a origem física de emissão: AGN ou formação estelar. Ambos os fenômenos geram linhas de emissão de $H\alpha$. Estrelas massivas, recentemente formadas, emitem em comprimentos de onda mais energéticos que acabam ionizando o gás ao seu redor que reemite $H\alpha$. O processo de acreção de matéria em AGNs gera a emissão de linhas em praticamente todo o espectro (depende do tipo de AGN), inclusive $H\alpha$ e $[NII]$ (Richardson et al., 2014).

Uma forma de diferenciar esses dois processos é, então, comparar a emissão de $H\alpha$ com a emissão de $[NII]$: galáxias com núcleo ativo emitem mais $[NII]$ em proporção ao $H\alpha$ do que galáxias que possuem apenas formação estelar. Para isso, utilizamos o diagrama WHAN (Cid Fernandes et al., 2011) para diagnosticar os diferentes fenômenos pela largura da linha de $H\alpha$ pela razão das linhas de emissão $[NII]$ e $H\alpha$, este gráfico está mostrado na figura 4.1.1.

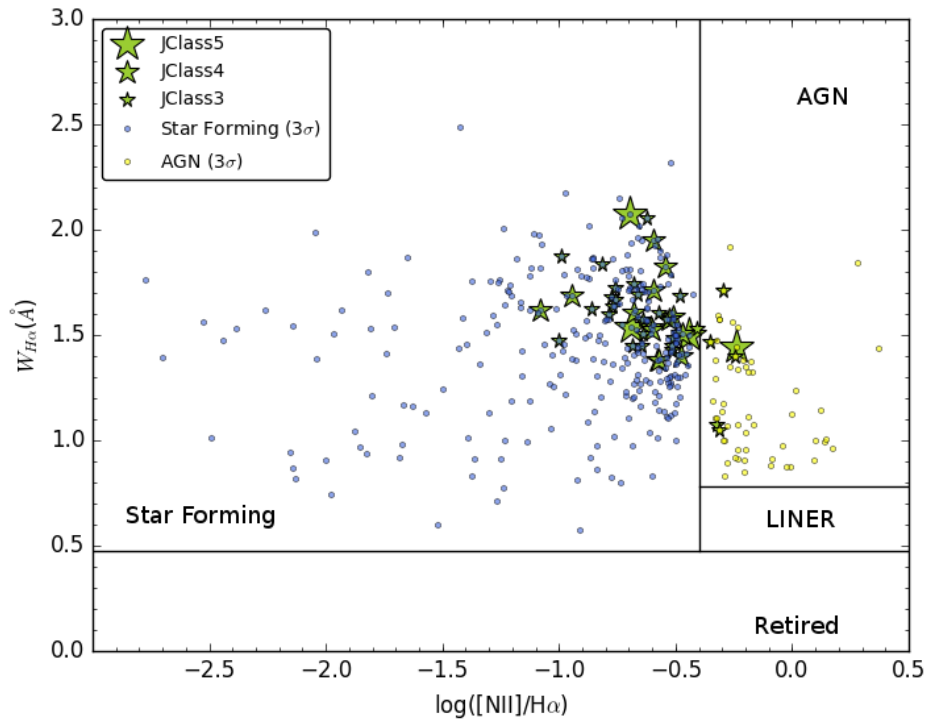


Figura 4.1.1 – Diagrama WHAN (Cid Fernandes et al., 2011) para o diagnóstico da origem física da emissão das linhas de $H\alpha$ e $[NII]$.

Dependendo da localização das galáxias nesse diagrama, o mecanismo dominante da emissão dessas linhas pode ser por AGN (quadrante AGN e LINER) ou formação estelar (quadrante *Star Forming*). Quanto mais distante das linhas de separação dos quadrantes, mais significativa é essa diferença. Essa análise resultou que 5 das galáxias candidatas são hospedeiras de um núcleo ativo e 39 são galáxias com formação estelar. As outras 2 galáxias restantes caem muito próximas da linha de separação e não é possível determinar o mecanismo de origem da emissão de maneira significativa.

4.1.1 Morfologia

Como parte do *survey* STAGES (Gray et al., 2009), as galáxias da amostra já tiveram suas morfologias previamente determinadas. É interessante verificar a distribuição da morfologia atribuída a essas galáxias anteriormente à classificação como candidatas à galáxias *jellyfish*, isso pode ser observado na figura 4.1.2.

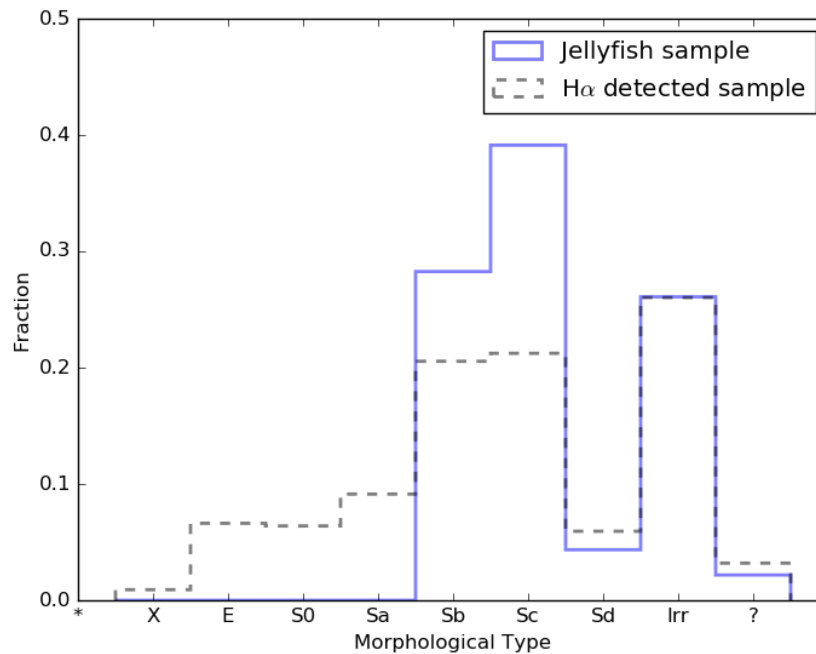


Figura 4.1.2 – Distribuição das morfologias previamente atribuídas às galáxias *jellyfish* candidatas.

Até pouco tempo atrás, essas galáxias não seriam reconhecidas como uma morfologia de transição entre fases evolutivas. Da amostra, todas as galáxias foram anteriormente classificadas como espirais *late-type*, galáxias peculiares ou galáxias com morfologia não identificada.

4.1.2 Massa

Todas as galáxias que possuem um reservatório de gás frio, independente de sua massa, estão sujeitas a sofrerem *ram-pressure stripping*. Porém ainda não se sabe a eficiência desse processo em relação à massa das galáxias.

A figura 4.1.3 mostra essa distribuição através de um histograma cumulativo. Percebe-se uma diferença entre a amostra de galáxias *jellyfish* que consideramos para as análises nesse trabalho e as galáxias com formação estelar ativa sem evidência de remoção de gás. As galáxias *jellyfish* parecem ser mais massivas, se aproximando da distribuição da amostra total do OMEGA (todas as galáxias com emissão em H α). Porém, isso aparenta ser um viés de seleção da amostra, pois galáxias mais massivas são mais brilhantes e, portanto, as evidências morfológicas de *ram-pressure stripping* são mais visíveis. Para verificar essa hipótese, foi verificada a distribuição da amostra de galáxias *jellyfish* candidatas com as JClasses mais baixas (1 e 2), pois essas possuem as evidências morfológicas de remoção de gás mais fracas da amostra. Percebe-se que essas galáxias possuem uma distribuição de massas que se estende mais na região das galáxias pouco massivas do que a amostra de

galáxias JClasses mais altas que mostra que essas evidências de remoção de gás aparecem em um gradiente grande de massas.

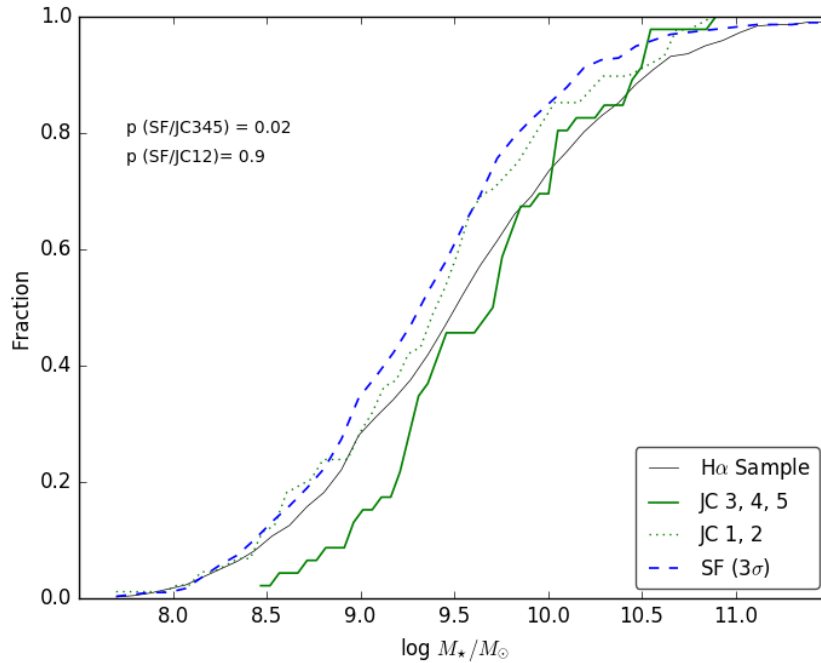


Figura 4.1.3 – Histograma cumulativo da distribuição de massas das amostras: OMEGA (linha preta sólida); candidatas *jellyfish* JClasses 3, 4 e 5 (linha verde sólida); candidatas *jellyfish* JClasses 1 e 2 (linha verde pontilhada); e galáxias com formação estelar ativa (linha azul traçada).

Dessa forma, a amostra de galáxias *jellyfish* candidatas selecionadas de maneira visual possui um viés na seleção das galáxias mais massivas. Além disso, não foi observada uma diferença grande o suficiente nas populações que pudesse sugerir que há uma preferência física na remoção de gás por pressão de arrasto como função da massa dessas galáxias.

4.1.3 Outras características

Procuramos validar a amostra também analisando a influência da presença de membros em uma vizinhança próxima das galáxias, a fim de descartar na amostra a possibilidade de haver muitas morfologias características de galáxias sofrendo interações gravitacionais com galáxias companheiras. Para isso, plotamos um histograma comparando a distância de cada galáxia até o membro vizinho mais próximos e encontramos que não há uma diferença significativa entre a população de galáxias *jellyfish* em relação ao resto das galáxias da amostra. A partir disso, concluímos que nossa seleção visual não foi enviesada em direção a selecionar galáxias que podem estar sofrendo um processo de *merging* ao invés de galáxias que estejam sofrendo uma remoção de gás por arrasto hidrodinâmico.

Do catálogo do STAGES, 44 das galáxias da amostra possuem um tipo espectral *blue-cloud* e as 2 restantes possuem um tipo espectral *dusty-red*. A amostra, em totalidade, está disposta no atlas anexado no apêndice.

4.2 *Trail Vectors*

A morfologia peculiar das galáxias *jellyfish* é resultado do movimento da galáxia pelo meio intra-aglomerado, formando tentáculos na mesma direção e no sentido contrário do movimento. Por essa razão, é possível atribuir visualmente um vetor que corresponda à direção desse movimento projetado na esfera.

Então, a segunda etapa da inspeção visual foi atribuir essa direção de movimento às galáxias da amostra *jellyfish* por indícios morfológicos. Para isso, os mesmos membros que participaram da seleção primária da amostra seguiram individualmente um método para designar esse vetor e então esses resultados foram comparados em grupo para que se chegasse a uma concordância no vetor final. O método consiste em identificar a direção do rastro mais estendido/predominante na morfologia da galáxia e então atribuir o vetor apontando na mesma direção e sentido contrário.

A figura 4.2.1 mostra um exemplo de uma galáxia JClass 4 da amostra com seu "*trail*" *vector* final correspondente. Também foi realizada uma análise qualitativa da concordância entre os vetores individualmente atribuídos. Para isso, a concordância foi determinada por um sistema de pontos descrito a seguir:

- 2 pontos: todos os vetores apontam no mesmo sentido;
- 1 ponto: pelo menos dois dos três vetores apontam no mesmo sentido;
- 2 pontos: todos os vetores possuem direções que estão contidas em um intervalo de até 45° ;
- 1 ponto: pelo menos dois dos três vetores apontam em uma direção com uma diferença de até 45° um do outro.

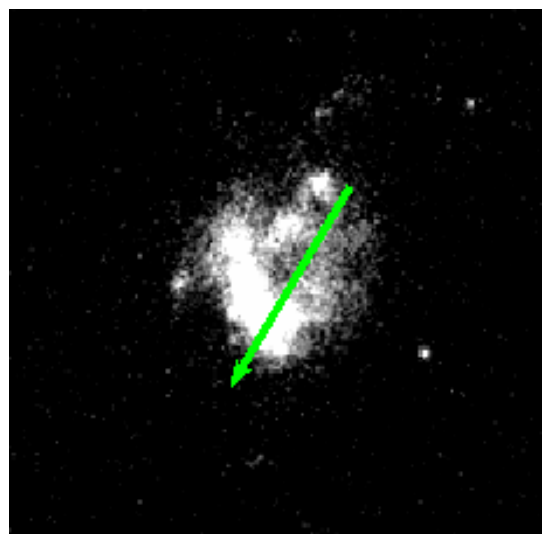


Figura 4.2.1 – Exemplo do *trail vector* de uma galáxia JClass 4.

Uma concordância **boa** foi considerada para os casos em que a galáxia some 4 pontos.

Uma concordância **média** foi considerada nos casos em que a galáxia some 3 pontos. E,

por fim, a concordância **ruim** foi atribuída para os casos em que a galáxia some de 0 a 2 pontos.

O ângulo de 45° foi considerado o ponto de divisão para a concordância pois a análise que foi feita na distribuição desses ângulos em redor dos subcentros considera apenas casos com uma diferença angular maior ou menor do que 90° .

No total foram 26 casos de **boa** concordância, 13 casos de **média** concordância e 7 casos de **má** concordância. É importante notar que nenhum caso de **má** concordância foi verificado para as JClasses 5 e 4.

5 Resultados

Nesse capítulo estão descritos os resultados obtidos através da análise das propriedades da amostra de galáxias *jellyfish* candidatas anteriormente selecionadas.

5.1 Propriedades da Formação Estelar

Podemos estudar melhor a formação estelar nessas galáxias estimando a taxa de formação estelar anual através da luminosidade da emissão em $H\alpha$ obtida com os dados do OMEGA. Essa taxa pode ser calculada através da seguinte equação (Kennicutt, 1998):

$$SFR(M_{\odot}yr^{-1}) = 7.9 \times 10^{-42} L(H\alpha)(ergss^{-1}) \quad (5.1)$$

que relaciona a luminosidade da emissão de $H\alpha$ com o número de estrelas formadas por unidade de tempo. Nesse caso, a emissão provém de regiões de gás ionizado por estrelas massivas, portanto jovens, funcionando como um traçador de formação estelar recente.

Como visto no diagrama WHAN, figura 4.1.1, a maior parte da amostra de galáxias *jellyfish* candidatas mostrou possuir formação estelar ativa e recente. Pode-se analisar a diferença da formação estelar dessa população comparada com as outras galáxias da amostra OMEGA que possuem formação estelar ativa. Mostramos isso na figura 5.1.1 através do gráfico da taxa de formação estelar específica (sSFR) por massa. A taxa de formação estelar específica é a taxa de formação estelar (SFR: equação 5.1) dividida pela massa estelar da galáxia.

As galáxias *jellyfish* estão representadas por estrelas verdes que variam em tamanho conforme a JClass atribuída: JClass 5 são os ícones maiores, JClass 4 intermediários e JClass 3 os menores. As outras galáxias da amostra OMEGA estão representadas por pontos azuis. Para analisar a distribuição da taxa de formação estelar específica, comparamos todas essas galáxias a sequência de formação estelar de galáxias de campo em um mesmo *redshift*. Ou seja, para verificar a influência do ambiente na amostra, verificamos quão diferente essas duas populações são de galáxias que, a princípio, não estão sofrendo alteração na taxa de formação estelar por mecanismos ambientais. Essa sequência de formação estelar está representada pela reta vermelha (Whitaker et al., 2012). Para fins de comparação, utilizamos outras duas retas no gráfico, com a mesma inclinação da reta vermelha, que traçam a mediana da taxa de formação estelar específica para a população de galáxias *jellyfish* (reta verde) e com formação estelar ativa (reta azul).

É visível a atenuação da formação estelar nas galáxias em ambientes densos, dado

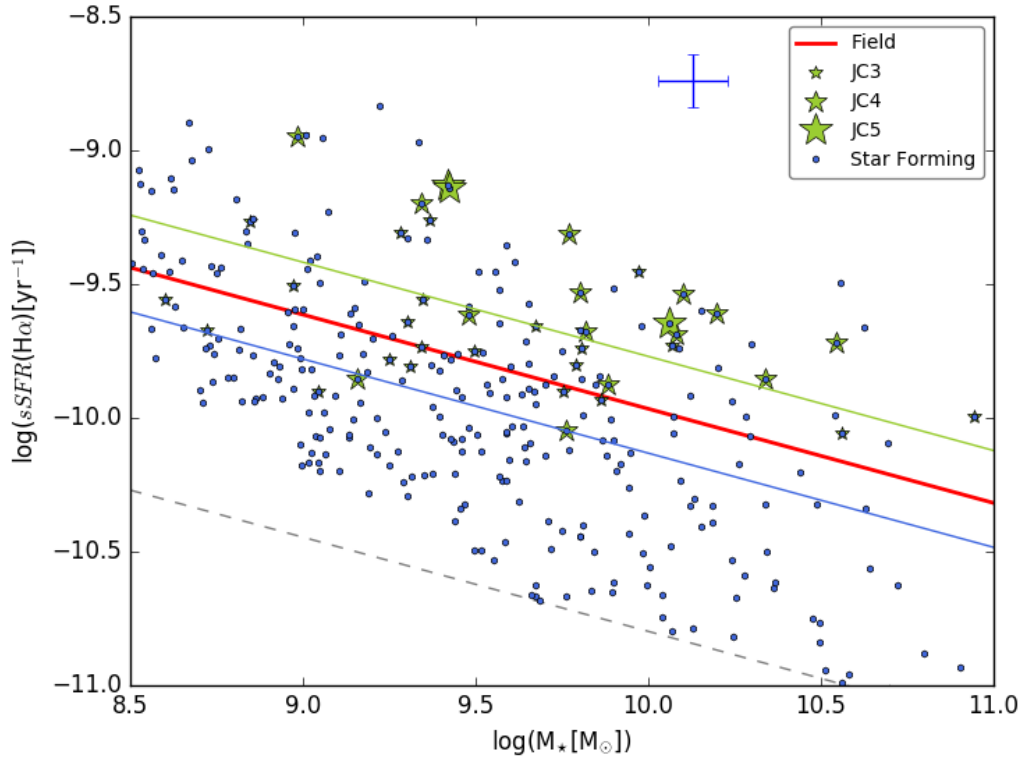


Figura 5.1.1 – Gráfico da taxa de formação estelar específica *versus* massa para as galáxias *jellyfish* candidatas (estrelas verdes) e galáxias com formação estelar ativa (pontos azuis). As galáxias da amostra *jellyfish* são separadas por JClass representadas pelo tamanho do ícone: quanto maior o símbolo da estrela, mais evidente é o fenômeno em sua morfologia. A reta vermelha corresponde a sequência de formação estelar para galáxias de campo em um mesmo *redshift* (Whitaker et al., 2012). Analogamente, as outras duas retas possuem a mesma inclinação da reta vermelha e traçam a mediana da taxa de formação estelar específica para as galáxias *jellyfish* (reta verde) e com formação estelar (reta azul).

que as galáxias com formação estelar do sistema possuem uma taxa de formação estelar específica abaixo do que se esperaria de galáxias de campo no mesmo *redshift*. Vemos que as galáxias *jellyfish* candidatas aparentam ter uma taxa de formação estelar específica muito mais alta do que as outras galáxias da amostra, e até mesmo comparadas às galáxias de campo.

Quantificamos a diferença entre as duas populações através de um teste K-S em dois histogramas cumulativos para testar a significância dessa diferença. Os resultados estão mostrados na figura 5.1.2. O histograma cumulativo foi construído através da diferença entre a taxa de formação estelar específica de cada galáxia e a sequência principal de formação estelar, criando assim as duas curvas mostradas em cada gráfico. A curva pontilhada mostra o histograma cumulativo para a toda a amostra de galáxias *jellyfish* candidatas (JClasses 3, 4 e 5) (significância: $p=0.00002$). Verificamos também o quanto esse resultado se altera ao considerar apenas os casos mais evidentes de *ram-pressure stripping*, ou seja, apenas as JClasses 4 e 5 cuja curva está representada pelo tracejado

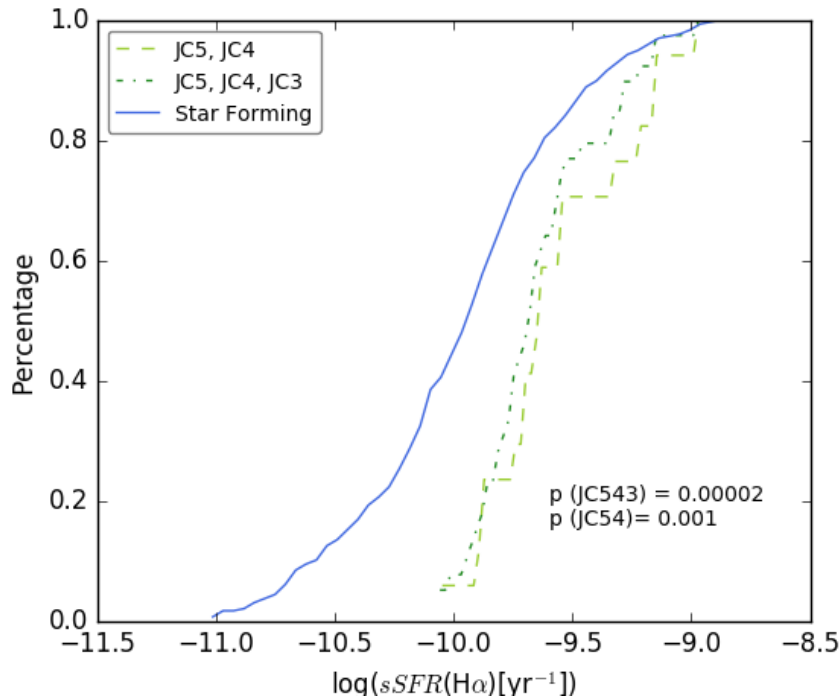


Figura 5.1.2 – Histograma cumulativo da diferença entre a sequência de formação estelar para galáxias de campo e as galáxias *jellyfish* JC5, JC4 e JC3 (tracejado verde), apenas as galáxias JC5 e JC4 e as galáxias com formação estelar ativa.

(significância: $p=0.001$).

Para ambos esses casos encontramos que a população de galáxias *jellyfish* possuem uma taxa de formação estelar específica significativamente mais alta do que as galáxias com formação estelar ativa do sistema. A leve queda de significância entre os resultados ($p=0.00002$ para as JClasses ≥ 3 e $p=0.001$ para JClass ≥ 4) é provavelmente devido à restrição da amostra, de 46 galáxias para apenas 18, e não a uma diferença na física envolvendo os dois subgrupos da amostra.

Um outro estudo independente, Rawle et al. (2014), estudou a taxa de formação estelar específica de galáxias *jellyfish* no sistema Abell 2744, onde uma das quatro galáxias estudadas se mostrou *starburst*.

5.1.1 Emissão do $H\alpha$

Os dados do OMEGA permitem obter informação espacial da emissão de $H\alpha$ e, já que o $H\alpha$ se comporta como um traçador de formação estelar, funciona também para visualizar de que maneira essa formação estelar se distribui nas galáxias.

Analisamos isso graficando os contornos da emissão do $H\alpha$ em cima da imagem do Hubble.

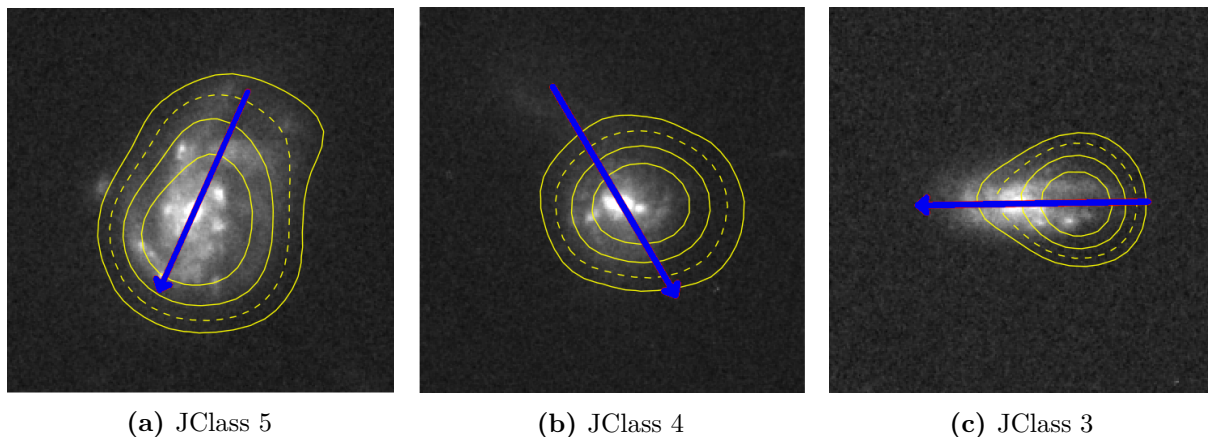


Figura 5.1.3 – Exemplo dos contornos da emissão em $H\alpha$ para uma galáxia JClass 5, JClass 4 e JClass 3, respectivamente.

A figura 5.1.3 mostra um exemplo desses contornos para uma galáxia JClass 5, JClass 4 e JClass 3. Os contornos mostram a emissão em cinco níveis (em escala logarítmica de base 10) que variam da emissão máxima até a um limite mínimo considerado como 15 vezes o limiar da emissão do ruído. Para as outras galáxias restantes, os contornos encontram-se no apêndice. Apenas para duas galáxias, 14385 e 35964 (ambas JClass 4), não foi possível obter as imagens dos contornos da emissão do $H\alpha$ sobre o contínuo. Por não haver parâmetros estruturais suficientes para gerar os contornos ou não haver imagens suficientes do contínuo para gerar o *stamp* da imagem do Hubble

Percebemos que a distribuição espacial da emissão em $H\alpha$ da amostra é visivelmente perturbada e estendida, em que essa extensão às vezes concorda com o vetor atribuído para seu movimento. Como a amostra foi selecionada apenas por evidências morfológicas de remoção de gás nas imagens do Hubble na faixa visível, é interessante perceber que essa forma de seleção se mostrou condizente também com a formação estelar ativa na galáxia.

Sobre a concordância dos contornos da emissão com os vetores de movimento, classificamos as galáxias em três casos: em que a extensão dos contornos segue o *trail vector* no sentido da seta, ou seja, o pico de emissão está a "frente" do vetor (como na galáxia JClass 5 da imagem 5.1.3a); em que a extensão dos contornos segue o sentido contrário ao da seta (como na galáxia JClass 5 da imagem 5.1.3c); e em que os contornos não parecem seguir o *trail vector* (como na galáxia JClass 4 da imagem 5.1.3b).

Essa classificação foi feita de maneira arbitrária e visual e está disposta na tabela 1. Todas as imagens com os contornos e *trail vectors* estão dispostas no Atlas disponível em apêndice.

Percebemos nessa análise preliminar que a maior parte das galáxias ou não mostra relação com o *trail vector* (19 casos), ou mostra uma emissão mais concentrada na parte "dianteira" da galáxia (21 casos). Apenas 4 das galáxias possuem uma formação estelar na região contrária ao movimento. Isso pode indicar que o *ram-pressure stripping* pode

	IDs								
Indiferente	7431	8559	10565	11633	12539	13497	15732	17396	17849
	19675	19140	20056	20100	28780	29371	29826	30604	35120
	40968								
Afrente	4657	7005	7479	8616	9524	11810	11827	13968	17464
	17974	25122	31084	33534	36376	40535	42713	42742	45301
	46664	50962	55188						
Atrás	13806	18385	18609	24529					

Tabela 1

eivar a taxa de formação estelar mais eficientemente na região frontal da galáxia do que no rastro de gás. Porém, isso depende muito da boa concordância dos vetores e uma parte considerável da amostra não mostrou relação com as direções atribuídas.

O estudo mais aprofundado das propriedades de formação estelar espacialmente resolvidas para toda a amostra do OMEGA está sendo conduzido pelo Bruno Rodríguez del Pino, onde haverá também uma análise mais detalhada sobre a extensão e concentração da emissão de H α em galáxias *jellyfish* (Rodríguez del Pino et al. 2018, *in prep.*).

5.2 Propriedades do Ambiente

O sistema multi-aglomerado A901/2 é um sistema ainda em interação que envolve 4 subcentros: 3 aglomerados Abell (A901a, A901b e A902) e um sistema de grupos e filamentos (SW group - *grupo sudoeste*).

Subcentro	ra	dec	sigma (km/s)
A901a	149.1099	-9.9561	562,84
A901b	148.9889	-9.9841	555,70
A902	149.1424	-10.1666	374,63
SW group	148.9101	-10.1719	420,56

Tabela 2 – Coordenadas e velocidades σ dos subcentros do sistema A901/2.

Na tabela 2 estão dispostas as coordenadas desses subcentros e também suas velocidades σ . Essas velocidades σ foram calculadas de acordo com a seguinte expressão:

$$\sigma_{DM}(M_{\text{halo}}, z) = c_1 \left(h(z) \frac{M_{\text{halo}}}{10^{-15}} \right)^{c_2} \quad (5.2)$$

Onde as constantes c_1 e c_2 valem, respectivamente, 1082.9 e 0.3361. Essa equação foi retirada de Evrard et al. (2008). Além disso, foi utilizado $h(z) = 0.759$. As coordenadas e as massas dos aglomerados foram retiradas de Heymans et al. (2008) onde adotamos os parâmetros de modelo de halo único.

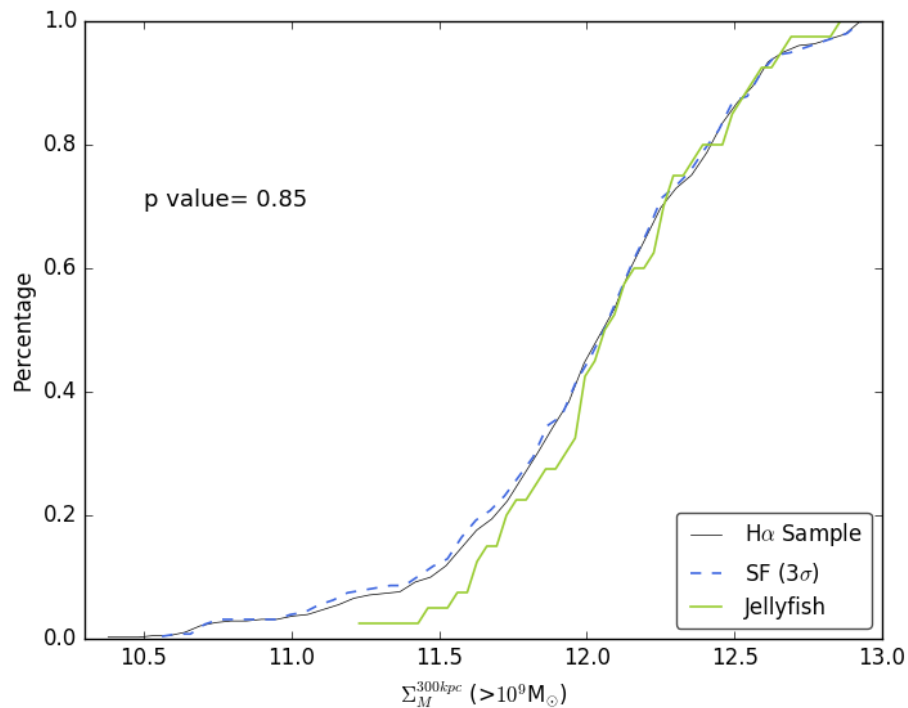


Figura 5.2.1 – Histograma cumulativo da distribuição das galáxias por densidade de matéria estelar. Compara-se as galáxias *jellyfish* candidatas às galáxias com formação estelar da amostra OMEGA.

O ambiente possui um papel relevante na evolução das galáxias de um sistema. Para compreender essa importância, tentamos encontrar alguma relação entre a posição das galáxias *jellyfish* ao redor do sistema A901/2.

Na imagem 5.2.1 vemos um histograma cumulativo das galáxias distribuídas por densidade de matéria estelar no ambiente. Essa densidade é definida, por questão de consistência com os outros trabalhos do OMEGA, como a integração de toda matéria estelar de objetos com mais de $10^9 M_\odot$ em uma vizinhança de até 300kpc ao redor da galáxia em questão. Isso é uma maneira de determinar quantos companheiros massivos existem até uma certa proximidade da galáxia, que pode afetar sua evolução por processos de interação. Vemos no gráfico a distribuição das galáxias *jellyfish* em comparação com as galáxias com formação estelar ativa e também com toda a amostra OMEGA. Percebe-se que há uma pequena tendência, que não se mostrou significativa, de que galáxias *jellyfish* estariam em ambientes um pouco mais densos, pois o crescimento da curva é um pouco mais abrupto do que das outras duas populações. Mas, não é possível concluir que as galáxias *jellyfish* tenham uma distribuição diferente das outras galáxias nesse quesito.

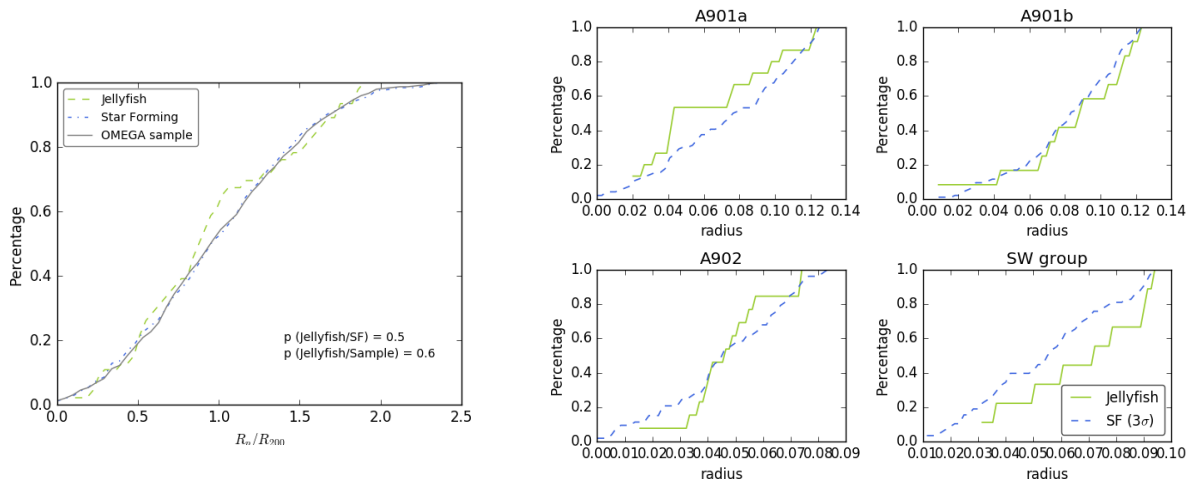


Figura 5.2.2 – Painel esquerdo: histograma cumulativo da distribuição de distâncias radiais (normalizadas) das galáxias do aglomerado. Compara-se as galáxias *jellyfish* candidatas à amostra total do OMEGA e às galáxias com formação estelar ativa. Painel direito: histograma cumulativo da distribuição de distâncias radiais das galáxias por subcentro. Compara-se as galáxias *jellyfish* candidatas às galáxias com formação estelar ativa.

Na figura 5.2.2 há dois painéis de gráficos onde tentamos encontrar alguma evidência em relação à posição radial das galáxias *jellyfish* a algum dos subcentros do aglomerado. O primeiro painel mostra um histograma cumulativo da distância radial até o subcentro mais próximo normalizada pelo respectivo raio virial do subaglomerado (R_{SC}/R_{200SC}). Vemos, novamente, uma distribuição levemente diferente em relação às outras galáxias, porém essa tendência não é significativa. Nesse caso, ela aponta no sentido de que as galáxias *jellyfish* estariam levemente mais próximas dos subcentros. No painel direito da figura 5.2.2, subdividido em quatro, procuramos investigar as mesmas propriedades, porém, ao invés de analisar uma distância radial normalizada, dividimos as galáxias por subcentro. Cada subcentro foi analisado pelo número de galáxias que estavam no interior do raio R_{200} do subcentro em questão e o eixo das ordenadas mostra a distância em graus do subcentro estudado. Não encontramos nenhuma diferença dignificativa da distribuição dessas galáxias em comparação com as galáxias com formação estelar no mesmo subcentro. Além disso, ao distribuir as galáxias por subcentro diminui-se muito a capacidade estatística da análise, pois temos então em média cerca de apenas 10 galáxias por subcentro.

5.2.1 Distribuição Espacial dos Eventos de *Ram-pressure Stripping*

As galáxias *jellyfish* sofrem a remoção de seu gás por consequência de caírem em um meio mais denso, como atravessar o gás intra-aglomerado que é mais denso nas regiões centrais dos sistemas. Com os *trail vectors* que atribuímos a cada uma das galáxias da amostra, é possível inferir como essas galáxias se movimentam no plano do céu.

A figura 5.2.3 mostra a distribuição espacial das galáxias *jellyfish* da amostra ao redor dos subcentros. Os seus respectivos *trail vectors* também estão representados pelas

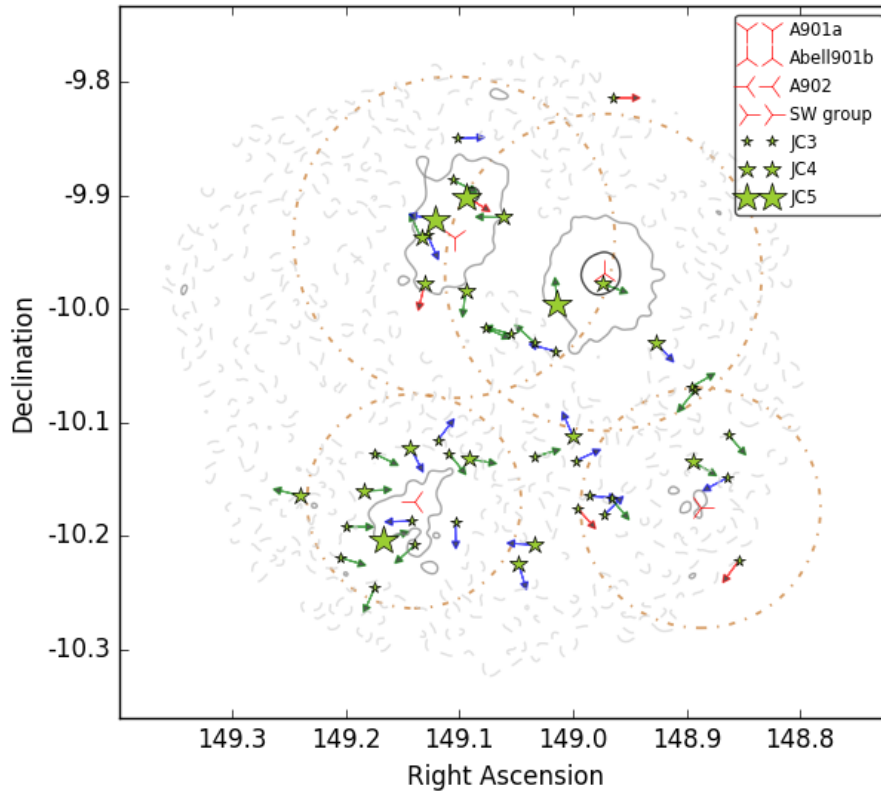


Figura 5.2.3 – Distribuição espacial das galáxias *jellyfish* no sistema Abell 901/2. As setas representam o *trail vectors* de cada galáxias *jellyfish*, as mesmas também estão indicadas diferentemente por JClass: JC5 sendo os símbolos maiores, JC4 os intermediários e JC3 os menores. Os círculos (linha traço-pontilhada marrom) representam os raios R_{200} de cada aglomerado. Os contornos cinzas mostram a densidade de gás, pela emissão de raio-X, do aglomerado em três níveis de significância: 3σ (linha sólida escura), 2σ (tracejado escuro) e 1σ (linha sólida clara).

setas e cada subcentro tem seu raio R_{200} simbolizado pelos círculos. Com os *trail vectors* atribuídos para as galáxias, verificamos se as galáxias estavam caindo para dentro ou para fora de algum dos subcentros. Para isso, para cada galáxia calculamos a diferença angular entre o vetor do movimento (*trail vector*) e um vetor apontando para o subcentro mais próximo (em distância projetada). Se essa distância foi menor do que 90° , consideramos que a galáxia está caindo no sistema e, se essa distância foi maior do que 90° , então a galáxia estaria se afastando do subcentro.

Na tabela 5.2.3 estão distribuídos o número de casos de galáxias caindo/indo para fora do sistema por JClasses. Como levantado na subseção anterior, a análise por subcentro fica mais complicada estatisticamente pois o número de casos por subcentro é bem menor. Porém, ainda é possível verificar certos comportamentos.

O aspecto mais visível que vemos na distribuição das galáxias é a aparente falta de casos de galáxias *jellyfish* no subcentro A901b. O interessante é que esse é uma das regiões mais massivas do sistema (sendo a outra o Abell901a) e possui a maior quantidade de

Aglomerado	JC5	JC5+JC4	JC5+JC4+JC3	
A901a	1	2	5	para o centro
	1	4	6	para fora
A901b	1	1	1	para o centro
	0	2	5	para fora
A902	1	3	7	para o centro
	0	4	10	para fora
SW group	0	1	9	para o centro
	0	1	3	para fora

Tabela 3 – Distribuição espacial das galáxias por direção do movimento.

	<i>Star Forming</i>	JClass 4, 5	JClass 3, 4, 5
A901a	101	11	6
A901b	99	5	3
A902	117	17	7
SW group	93	12	2

Tabela 4 – Número de galáxias *jellyfish* e de galáxias com formação estelar por aglomerado.

emissão de raio-x do sistema e, portanto, é a região mais rica em gás quente. Na tabela 4 vemos o número de casos de galáxias *jellyfish* por subsistema além do número de casos de galáxias com formação estelar para avaliar melhor essa aparente falta de casos de galáxias *jellyfish* no subcentro A901b. Além disso, na figura 5.2.4 também vemos a distribuição de matéria escura dos aglomerados (em contornos brancos) sobre a emissão luminosa do sistema, retirado de Heymans et al. (2008). Se considerarmos apenas a razão entre o número de galáxias *jellyfish* para galáxias com formação estelar, sem restringir para JClasses maiores que 4, percebemos que essa razão é de fato menor no aglomerado A901b, onde há apenas 5 galáxias *jellyfish* para 99 galáxias com formação estelar ($n_j/n_{sf}=0.05$). Para os outros aglomerados esse número é levemente maior (n_j/n_{sf} entre 0.10 e 0.15). Se restringirmos a amostra para apenas os casos fortes (JClass 4 e 5) então vemos que há poucos casos em qualquer um dos subsistemas. Vemos que para os aglomerados A901a e A902 a razão n_j/n_{sf} fica em torno de 0.05 e para o aglomerado A901b e o grupo SW a razão n_j/n_{sf} ficar em torno de 0.02. Além disso, pela imagem 5.2.4 e também pela análise feita em Heymans et al. (2008), os aglomerados A901a e A901b se mostraram ser os mais massivos do sistema e não foram encontradas evidências para uma variação na razão massa luz entre os aglomerados.

A figura 5.2.5 mostra o mesmo gráfico mostrado na figura 5.2.3 porém sem as galáxias classificadas como JClass 3. Ao visualizar apenas as galáxias com grandes evidências de estar passando por uma fase de remoção de gás por *ram-pressure stripping*, as JClass 4 e 5, vemos que há poucos casos evidentes ao redor do grupo sudoeste, e que boa parte dos casos se concentram nos subcentros do Abell 901a e Abell 902. Também, agora é mais evidente a concentração das galáxias em tornos das regiões centrais, mais virializadas, do

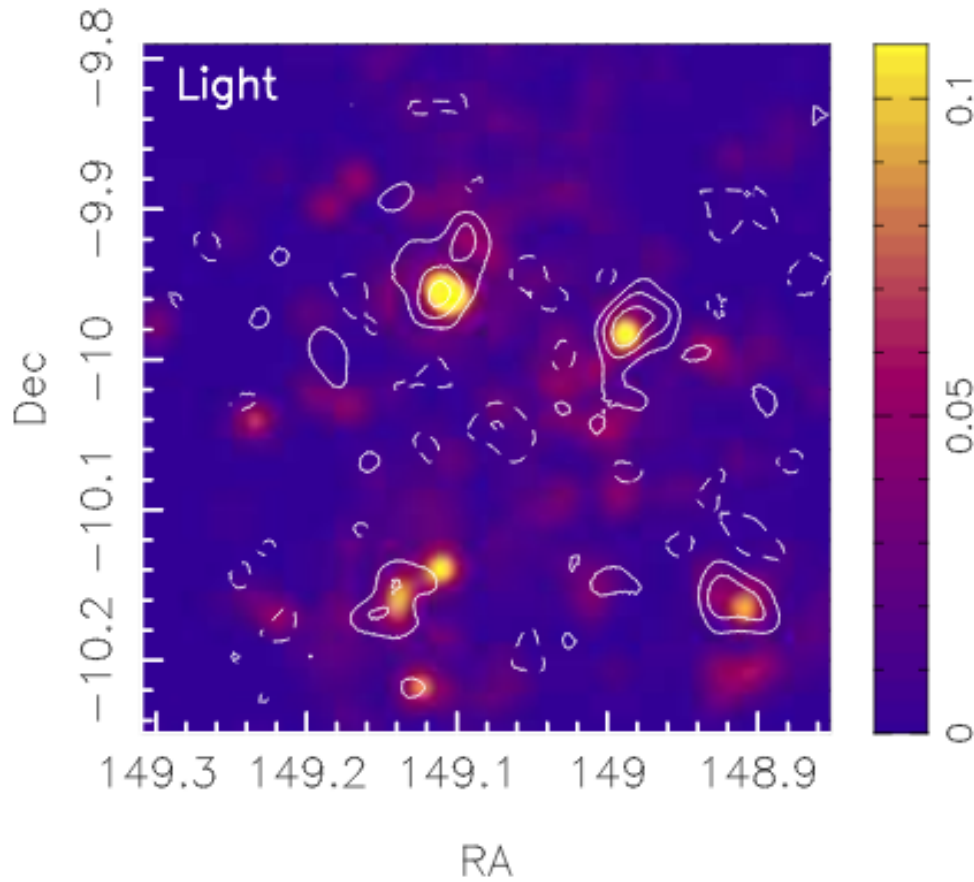


Figura 5.2.4 – Mapa de contornos da matéria escura analisada por técnicas de *weak-lensing* sobre a emissão luminosa do sistema A901/2 (Heymans et al., 2008).

sistema.

A princípio, é de se esperar que a quantidade de gás quente distribuído no sistema influencie a formação das galáxias *jellyfish*. Quanto mais gás, maior a densidade do meio e, portanto, mais fortemente o atrito viscoso ocorrerá nas galáxias que atravessam esse meio, já que a equação que regula o fenômeno depende da densidade do meio (Gunn & Gott, 1972):

$$P_r \approx \rho_{ICM} v^2 \quad (5.3)$$

Onde P_r é a pressão de arrasto exercida na galáxia, ρ_{ICM} é a densidade do meio intra-aglomerado e v é a velocidade da galáxia na direção do movimento.

Isso pode explicar porque há tão poucos casos evidentes de galáxias *jellyfish* no sistema de grupos e filamentos sudoeste, já que essa é uma das regiões com menor presença de gás quente.

Já para o sistema A901b, a explicação deve ser um pouco diferente. É o subcentro com maior concentração de gás quente e seria razoável esperar que fosse a região com mais

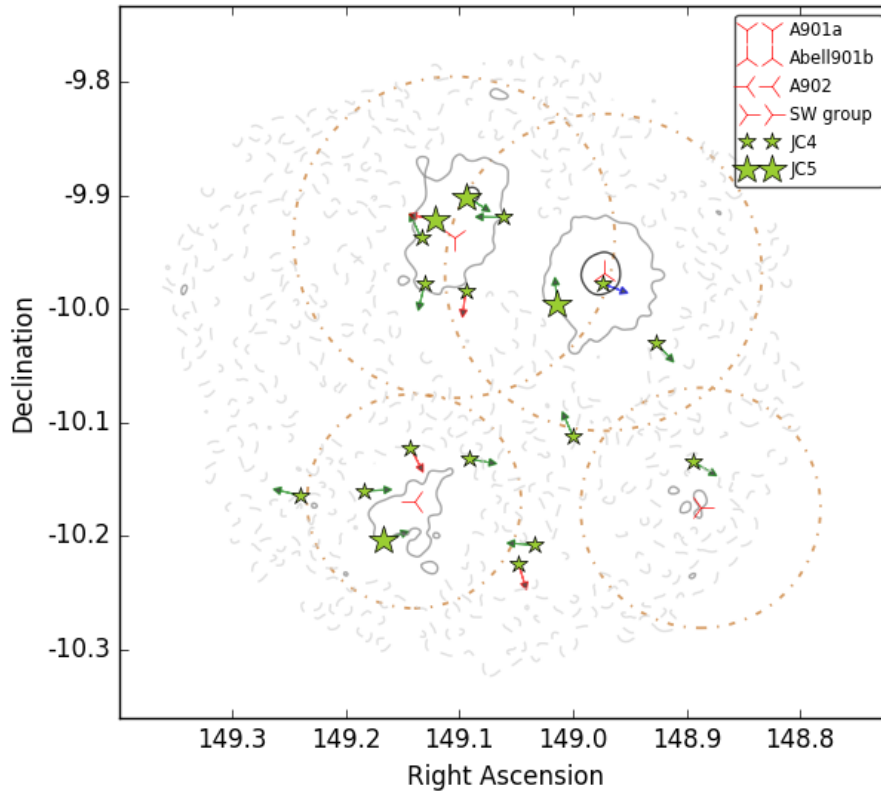


Figura 5.2.5 – Distribuição espacial das galáxias *jellyfish* no sistema Abell 901/2 para os casos mais evidentes. Como na outra imagem, as setas representam o *trail vectors* de cada galáxias *jellyfish* e as mesmas também estão indicadas diferentemente por JClass: JC5 sendo os símbolos maiores, JC4 os menores. Os círculos (linha traço-pontilhada marrom) representam os raios R_{200} de cada aglomerado. Os contornos cinzas mostram a densidade de gás, pela emissão de raio-X, do aglomerado em três níveis de significância: 3σ (linha sólida escura), 2σ (tracejado escuro) e 1σ (linha sólida clara).

galáxias *jellyfish* encontradas, o que não é o caso. Porém, a emissão em raio-x dessa região, além de ser alta, é bem concentrada e simétrica. A menos que haja a presença de um AGN forte no centro dessa emissão, é razoável alegar que esse subcentro possui um *cool-core*, que é um sinal de sistemas relaxados, mas isso só pode ser confirmado a partir de uma análise mais minuciosa do perfil de temperatura do meio intra-aglomerado. Um *cool-core* ocorre quando a quantidade de gás contido no centro de potencial de um aglomerado é tão grande que o próprio peso do gás sobre ele mesmo faz com que as partículas se organizem de maneira mais ordenada e a densidade aumente, tornando o centro da distribuição de gás mais frio do que o seu redor (Hudson et al., 2010). Porém, para descartar a hipótese do AGN forte central são necessário outros dados sobre a emissão do raio-x, já que os dados do XMM não permitem uma separação tão clara de emissão do gás quente intra-aglomerado e da emissão de raio-x por contribuição de AGNs.

Essas evidências indicam que o aglomerado Abell 901b é um sistema mais relaxado do que os outros aglomerados do sistema A901/2, porém outros estudos devem ser feitos

nesse sentido para confirmar as hipóteses descritas.

Contudo, é interessante pensar que talvez não há uma falta de galáxias *jellyfish* no sistema A901b, mas sim uma abundância delas os subcentros A901a e A902. Tanto simulações de aglomerados, quanto a escassa presença dessas galáxias observadas no universo, mostram que galáxias *jellyfish* são um fenômeno raro. Isso se deve bastante ao fato de que a escala de tempo desses eventos é pequena se comparada ao tempo do universo, da ordem de 200 milhões de anos (Steinhauser et al., 2016). E também, o fato de que o aglomerado A901b é mais relaxado pode indicar alguma correlação entre a frequência da ocorrência dessas galáxias em sistema que possam estar interagindo, como A901a e A902.

Sobre a direção do movimento dessas galáxias, não é possível perceber um movimento preferencial das galáxias em torno dos subcentros. Com exceção do subcentro SW em que 9 das 10 galáxias estão caindo (vale ressaltar que 9 das 10 também foram classificadas como JClass3), todos os outros mostraram diferenças tênues em relação aos movimentos em direção para fora/para dentro dos subcentros.

Um trabalho similar foi realizado para as galáxias com evidência de remoção de gás no aglomerado de Coma (Smith et al., 2010). Diferentemente do nosso trabalho, o estudo apontou que a maioria das galáxias estudadas estavam caindo em direção ao aglomerado. Porém, Coma é um sistema mais relaxado e com apenas um centro, diferentemente do Abell901/2.

Possivelmente, a presença de mais de um centro massivo acabe perturbando a forma com que essas galáxias caem no aglomerado sem dar preferência para um subcentro específico.

Entretanto, há certas limitações nesse estudo que devem ser consideradas. Além desses vetores terem sido atribuídos via inspeção visual e dependerem da qualidade da concordância entre os classificadores, eles apenas podem supor sobre as propriedades projetadas do movimento dessas galáxias.

5.3 Diagrama do Espaço de Fase e atividade nuclear

Como mostrado na figura 2.1.2, os dados obtidos com o instrumento OSIRIS permitem construir um espectro curto de baixa resolução. Com isso, podemos obter além do *redshift* de cada membro do sistema, também as velocidades radiais (velocidade na linha de visada do objeto).

Na figura 5.3.1 mostramos o diagrama de espaço de fases das galáxias da amostra com as suas respectivas velocidades radiais calculadas com o OMEGA. Note que tanto as

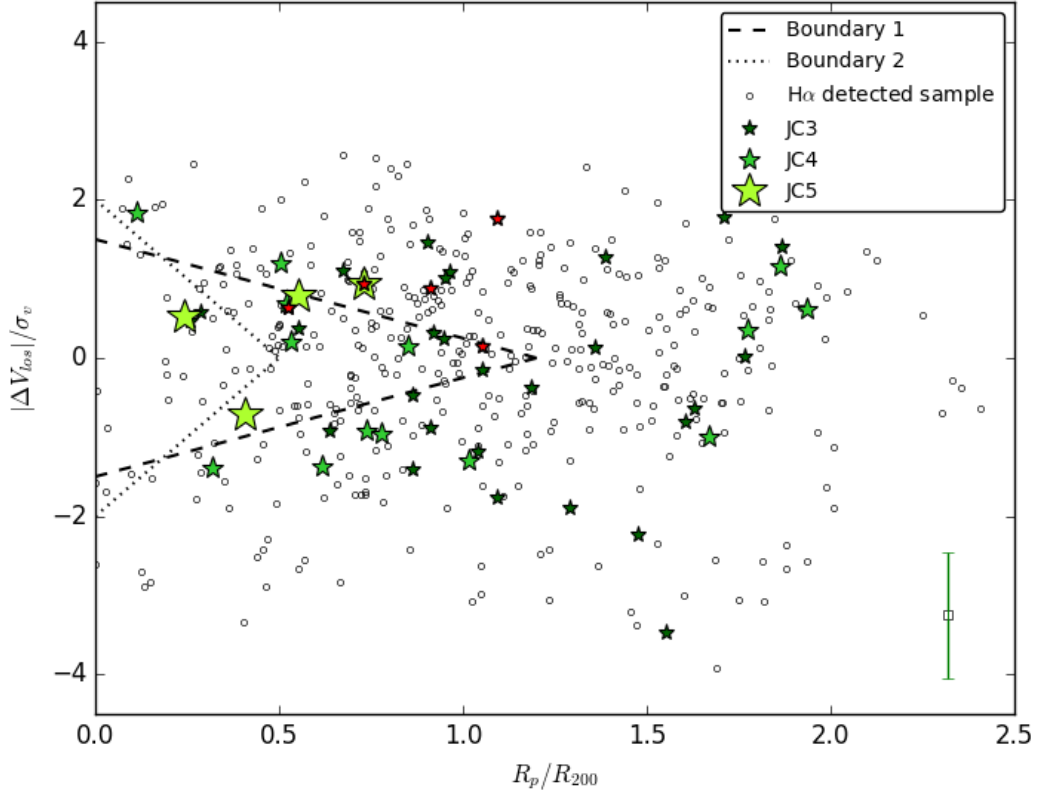


Figura 5.3.1 – Diagrama de espaço de fase para as galáxias *jellyfish*. As galáxias da amostra estão divididas por JClass e indicadas no gráfico pelos símbolos de estrelas por diferentes tamanhos: as maiores são JClass 5, as intermediárias JClass 4 e as menores JClass 3. As galáxias que são hospedeiras de um núcleo ativo estão sinalizadas com um símbolo de estrela vermelha. Todas as outras galáxias da amostra do OMEGA estão simbolizadas pelos círculos cinza. Avaliamos dois limites fiduciais: Boundary 1 (Jaffé et al., 2015) e Boundary 2 (Weinzirl et al., 2017).

velocidades quanto a distância até o subcentro é normalizada pela velocidade σ do sistema (calculada na seção anterior) e pelo raio R_{200} , para que se possa comparar as galáxias de diferentes subcentros entre si. A barra de erro também está indicada no canto inferior direito e é relativo ao erros no cálculo do *redshift* do OMEGA (Weinzirl et al., 2017).

No gráfico, foram analisados dois raios fiduciais, que indicam os limites da região virializada do sistema. O limite 1 é definido como $R_p/R_{200} \leq 1.2, |\Delta V_{los}/\sigma_{scl}| \leq 1.5 - 1.5/1.2 \times R_p/R_{200}$ e foi retirado de Jaffé et al. (2015) onde foi analisado um sistema de massa e *redshift* semelhantes ao sistema A901. O segundo limite, definido por $R_p/R_{200} \leq 0.5e|\Delta V_{los}/\sigma_{scl}| \leq 2.0 - 2.0/0.5 \times R_p/R_{200}$, foi retirado de Weinzirl et al. (2017) que analisa em detalhes as propriedades das galáxias do OMEGA no diagrama de fases.

Pela figura, aparentemente, os casos visualmente mais extremos (JClass 5) estão concentrados mais próximos da região virializada do aglomerado. Além disso, observando também a presença de AGN nessas galáxias (representado pelo símbolo vermelho), percebe-se que, dos 5 AGNs contidos na amostra, apenas um AGN é hospedado por uma galáxia

JClass 5, sendo todos os outros hospedados por galáxias JClass 3. Essas galáxias também habitam um regime de distância projetadas maiores. Isso torna a conexão entre um evento de retirada de gás por *ram-pressure stripping* e um núcleo ativo muito fraca para essa amostra.

Dados esses resultados, é seguro dizer que o evento de retirada do gás nas galáxias dessa amostra não parece ter engatilhado a atividade do buraco negro central. Essas evidências destoam do achado em Poggianti et al. (2017a), porém é importante notar que as galáxias analisadas nesse estudo estavam em uma região do diagrama do espaço de fases que nossos dados não chegam (velocidades acima de 3 vezes o σ do sistema).

6 Sumário e Conclusões

Nesse trabalho conduzimos um estudo sistemático sobre galáxias que possuem evidências morfológicas de remoção do gás interestelar de seus discos através do atrito hidrodinâmico com o meio intra-aglomerado no sistema Abell 901/2. Esse sistema é composto por múltiplos subsistemas e está localizado em um *redshift* $z \sim 0.165$. As principais análises e resultados obtidos estão descritos a seguir.

- (i) Uma amostra de galáxias *jellyfish* candidatas foi selecionada através de uma inspeção visual de todas as 439 galáxias da amostra original do OMEGA, resultando em 46 galáxias candidatas classificadas por intensidade do evento (JClasses).
- (ii) A amostra final selecionada é composta majoritariamente por galáxias com formação estelar ativa, porém possui também 5 AGNs. Apenas duas das galáxias se mostraram *dusty-red* e todas as outras são galáxias da *blue-cloud*. A morfologia anteriormente atribuída para essas galáxias variava entre espirais *late-type* e galáxias irregulares.
- (iii) Desenvolvemos um método de atribuição do movimento projetado aparente dessas galáxias no plano do aglomerado através de uma segunda inspeção visual das candidatas. Essas direções estão representadas por vetores, *trail vectors*, que foram classificados também pela concordância entre os classificadores.
- (iv) A análise das propriedades de formação estelar dessas galáxias mostra que elas possuem uma taxa de formação estelar específica significativamente mais alta do que quando comparadas com as outras galáxias com formação estelar ativa do mesmo sistema. Percebemos essa diferença ao analisar a diferença entre a taxa de formação estelar específica de cada galáxia dessas duas populações e a sequência de formação estelar de galáxias de campo, que não estão sofrendo a atuação de mecanismos ambientais. Algumas galáxias mostram emissão de $H\alpha$ perturbado e estendido assim como suas morfologias no visível. A emissão espacialmente resolvida do $H\alpha$ mostra correlação com a direção atribuída pelo *trail vector* para cerca de metade dos casos, indicando um formação estelar mais concentrada na parte frontal do movimento. Essas evidências indicam que, além de remover o gás frio, a pressão de arrasto também atua desencadeando formação estelar intensa nessas galáxias.
- (v) As galáxias *jellyfish* não parecem ocupar preferencialmente nenhuma região do sistema, nem em quesito de distância radial aos subcentros nem em densidade ambiental de matéria estelar. Ademais, quando analisadas as direções do movimento aparente no céu, indicadas pelos *trail vectors* atribuídos, percebe-se que não há evidências da preferência de um movimento com sentido convergente ou divergente a nenhum dos subcentros.

- (vi) A posição das galáxias da amostra no diagrama de fases mostra uma leve inclinação dos casos mais evidentes (JClass 5) estarem mais próximos das regiões virializadas do sistema. Além disso, a atividade do AGN das galáxias candidatas não parece estar relacionada com a remoção do gás por meio de *ram-pressure stripping*.

Por fim, a localização dessas galáxias no sistema ainda é pouco clara. Apesar de que há uma pequena tendência de que elas estejam nas regiões mais próximas das regiões centrais dos aglomerados, principalmente quando restringimos a amostra para as galáxias com evidências mais fortes (JClass 4 ou 5), não há evidências significativas. Percebemos que a distribuição delas ao redor do sistema é razoavelmente diferente do que visto em outros sistemas relaxados descritos na literatura, indicando que a existência de multi-centros no sistema altera a ocorrência desses eventos. Sobre isso, percebemos que o subcentro menos massivo, grupo SW, por possuir pouco gás também mostrou poucos casos. E para o subcentro A901b, percebemos o contrário: apesar de ser bastante massivo e possuir bastante gás também mostrou um número menor de casos do que os companheiros A901a e A902. Interpretamos isso pelo fato de que o aglomerado A901b parece ser mais relaxado do que os outros e de que a interação entre A901a e A902 possa estar aumentando a incidência de casos de galáxias *jellyfish*. O fato desse sistema ser um sistema múltiplo também parece influenciar a direção em que esses eventos ocorrem. Um estudo no aglomerado de Coma (Smith et al., 2010), um aglomerado relaxado e com apenas um centro de potencial, mostrou que a maioria das galáxias sofrendo *ram-pressure stripping* estavam caindo no aglomerado, já no nosso trabalho não há evidências apontando de que haja algum ponto de convergência dessas galáxias no sistema. Percebemos que a pressão de arrasto parece elevar a taxa de formação estelar específica dessas galáxias, pelo menos momentaneamente. E pelos *trail vectors* atribuídos podemos ver evidências fracas de que essa formação estelar esteja ocorrendo na parte frontal da galáxia.

Dado que as galáxias *jellyfish* logo serão exauridas de gás frio disponível para formação estelar, espera-se que após passar por esse período de transição, a galáxia ao fim poderá se tornar mais passiva e vermelha. Apesar de que esse processo é relevante para a evolução das galáxias, ainda é difícil dizer o quão dominante o processo de *ram-pressure stripping* é no processo de tornar as galáxias mais passivas em ambientes densos.

Em geral, foi possível abranger diversas análises devido a diversidade de dados disponíveis e conseguimos enriquecer o entendimento de como as galáxias são afetadas pelo mecanismo de *ram-pressure stripping*.

7 Considerações Finais e Perspectivas

Esse é o maior estudo conduzido sobre galáxias *jellyfish* candidatas em um sistema multi-aglomerado, formando uma das maiores amostras desse tipo de galáxias disponíveis para um único sistema. Os resultados estão sendo compilados no quarto artigo do OMEGA *survey* para futura publicação na revista *Monthly Notices of the Royal Astronomy Society*.

Os próximos passos do estudo das galáxias *jellyfish* no sistema A901/2 envolvem: aplicar o mesmo método de seleção visual a uma amostra de controle no mesmo sistema fora da amostra do OMEGA para avaliar a existência de um viés de seleção causado por selecionar apenas galáxias com emissão.; analisar detalhadamente a emissão espacialmente resolvida de $H\alpha$ da amostra *jellyfish* e de toda amostra OMEGA (Rodríguez del pino et al. 2018, *in prep.*); e também um estudo comparativo entre as propriedades observacionais analisadas nesse trabalho e de uma simulação do sistema A901/2 e suas galáxias *jellyfish*, que está em processo de construção por colaboradores (Rafael Ruggiero - USP/IAG, Rubens Machado - UTFPR e Gastão B. Lima Neto - IAG/USP).

Um projeto futuro também envolve o desenvolvimento de um método automático (se possível) para a detecção dessas galáxias em um grande número de dados, através de características morfométricas. Isso possibilitaria que mais grandes estudos fossem realizados com galáxias peculiares para poder entender melhor a natureza das suas morfologias irregulares.

Referências

- Alavi M., Razmi H., 2015, , 360, 26
- Aragón-Salamanca A., Bedregal A. G., Merrifield M. R., 2006, , 458, 101
- Barnes J. E., 1992, , 393, 484
- Bekki K., 1998, , 502, L133
- Bekki K., 1999, , 510, L15
- Bekki K., 2009, , 399, 2221
- Bekki K., 2014, , 438, 444
- Bekki K., Couch W. J., Shioya Y., 2002, , 577, 651
- Bell E. F., et al., 2004, , 608, 752
- Bellhouse C., et al., 2017, , 844, 49
- Bournaud F., Jog C. J., Combes F., 2007, , 476, 1179
- Burke C., Collins C. A., 2013, , 434, 2856
- Carroll B. W., Ostlie D. A., , 2nd (international) edn
- Chies-Santos A. L., et al., 2015, , 450, 4458
- Cid Fernandes R., Stasińska G., Mateus A., Vale Asari N., 2011, , 413, 1687
- Cortese L., et al., 2007.
- Dressler A., 1980, , 236, 351
- Dressler A., et al., 1997, , 490, 577
- Ebeling H., Stephenson L. N., Edge A. C., 2014, , 781, L40
- Evrard A. E., et al., 2008, , 672, 122
- Fasano G., Poggianti B. M., Couch W. J., Bettoni D., Kjærgaard P., Moles M., 2000, , 542, 673
- Fritz J., et al., 2017, , 848, 132
- Gray M. E., et al., 2009, , 393, 1275

- Gullieuszik M., et al., 2017, , 846, 27
- Gunn J. E., Gott III J. R., 1972, , 176, 1
- Haines C. P., La Barbera F., Mercurio A., Merluzzi P., Busarello G., 2006, , 647, L21
- Hewlett T., Villforth C., Wild V., Mendez-Abreu J., Pawlik M., Rowlands K., 2017, , 470, 755
- Heymans C., et al., 2008, , 385, 1431
- Hudson D. S., Mittal R., Reiprich T. H., Nulsen P. E. J., Andernach H., Sarazin C. L., 2010, , 513, A37
- Jaffé Y. L., Smith R., Candlish G. N., Poggianti B. M., Sheen Y.-K., Verheijen M. A. W., 2015, , 448, 1715
- Kennicutt Jr. R. C., 1998, , 36, 189
- Lambas D. G., Alonso S., Mesa V., O'Mill A. L., 2012, , 539, A45
- McPartland C., Ebeling H., Roediger E., Blumenthal K., 2016, , 455, 2994
- Moore B., Katz N., Lake G., Dressler A., Oemler A., 1996, , 379, 613
- Mullan B., et al., 2010, in Smith B., Higdon J., Higdon S., Bastian N., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 423, Galaxy Wars: Stellar Populations and Star Formation in Interacting Galaxies*. p. 129 (arXiv:0908.4308)
- Newton R. D. A., Kay S. T., 2013, , 434, 3606
- Nicol M.-H., Meisenheimer K., Tapken C., Wolf C., 2007, in Combes F., Palouš J., eds, *IAU Symposium Vol. 235, Galaxy Evolution across the Hubble Time*. pp 419–419, doi:10.1017/S1743921306010465
- Nipoti C., Binney J., 2007, , 382, 1481
- Planck Collaboration et al., 2016, , 594, A13
- Poggianti B. M., et al., 2016, , 151, 78
- Poggianti B. M., et al., 2017a, , 548, 304
- Poggianti B. M., et al., 2017b, , 844, 48
- Rawle T. D., et al., 2014, , 442, 196
- Richardson C. T., Allen J. T., Baldwin J. A., Hewett P. C., Ferland G. J., 2014, , 437, 2376

Rodríguez del Pino B., et al., 2017, , 467, 4200

Roediger E., Brüggem M., Owers M. S., Ebeling H., Sun M., 2014, , 443, L114

Ryden B., 2014, Introduction to Cosmology. CreateSpace Independent Publishing Platform,
<https://books.google.com.br/books?id=uHe6rQEACAAJ>

Schombert J. M., 1987, , 64, 643

Smith R. J., et al., 2010, , 408, 1417

Steinhauser D., Schindler S., Springel V., 2016, , 591, A51

Toomre A., 1977. p. 401

Weinzirl T., et al., 2017, , 471, 182

Whitaker K. E., van Dokkum P. G., Brammer G., Franx M., 2012, , 754, L29

8 Apêndice

Atlas

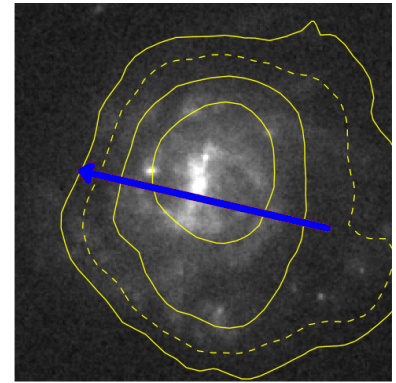
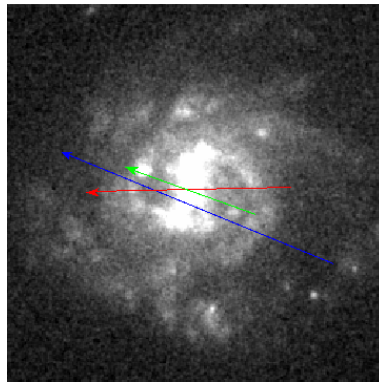
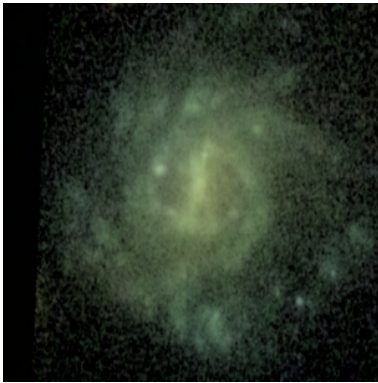
Todas as 46 galáxias da amostra de galáxias *jellyfish* candidatas estão dispostas nessa seção.

Cada galáxia possui, respectivamente, três imagens: composição RGB (dados do COMBO-17); imagem do Hubble com os três *trail vectors* atribuídos individualmente (verde: Ana; azul: Bruno; vermelho: Fernanda); e imagem do Hubble com o *trail vector* final sobre os contornos da emissão espacial de $H\alpha$.

A cor do vetor final varia conforme a concordância, sendo azul - **bom**, verde - **médio** e vermelho - **ruim**.

ID: 4657

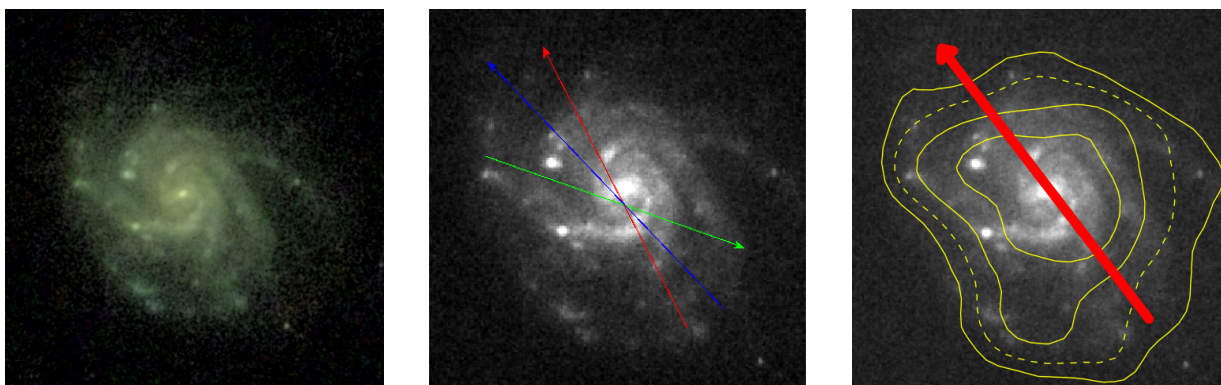
JClass: 3



Concordância: boa.

ID: 7005

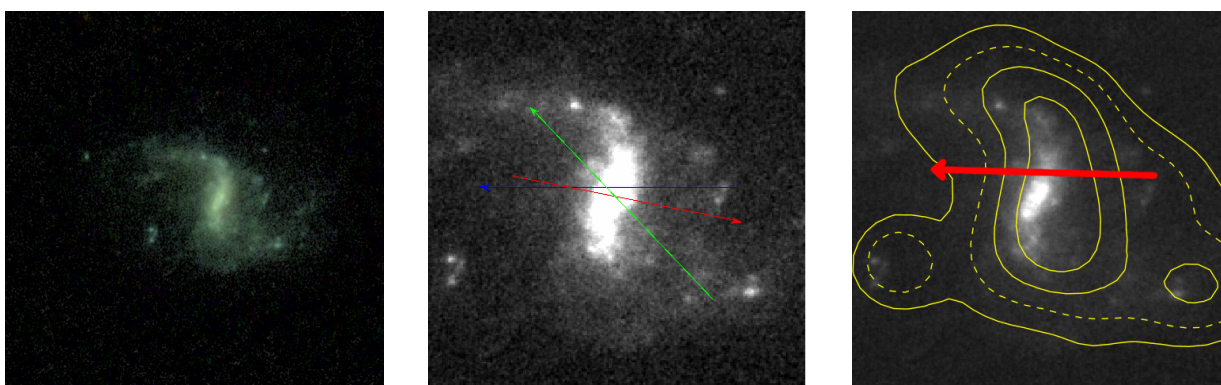
JClass: 4



Concordância: ruim.

ID: 7431

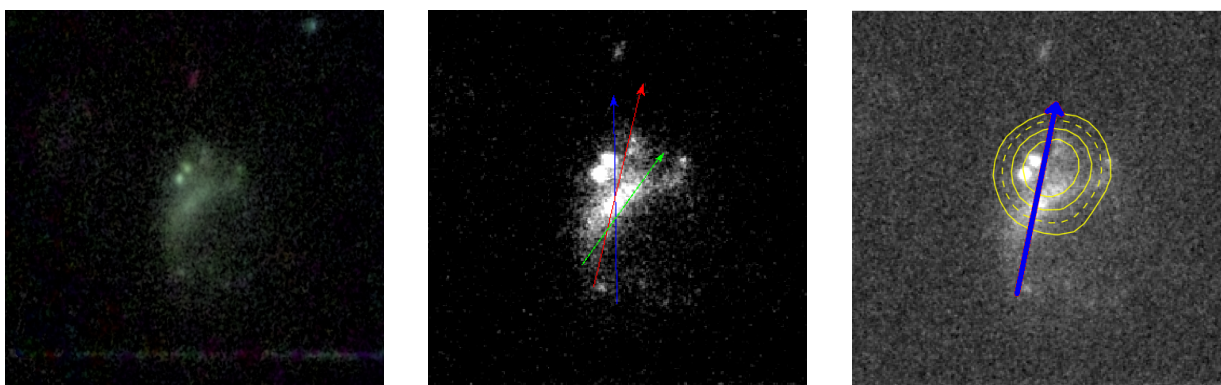
JClass: 3



Concordância: ruim.

ID: 7479

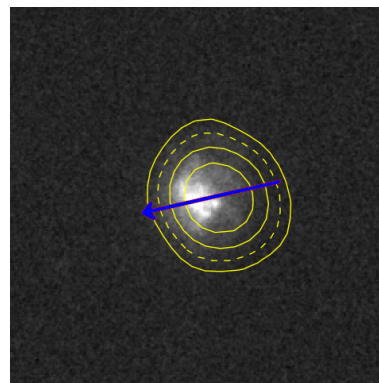
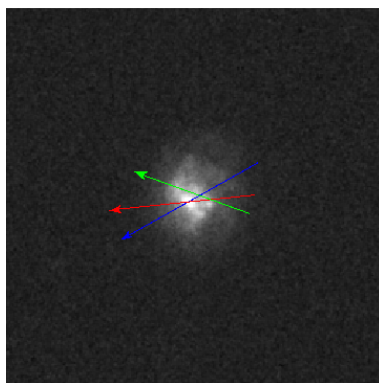
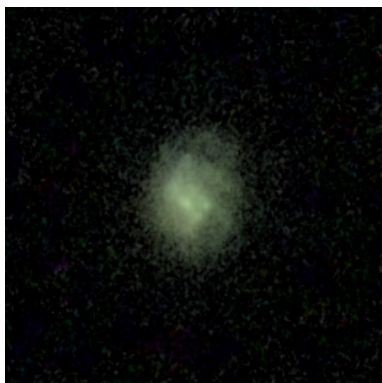
JClass: 3



Concordância: boa.

ID: 8559

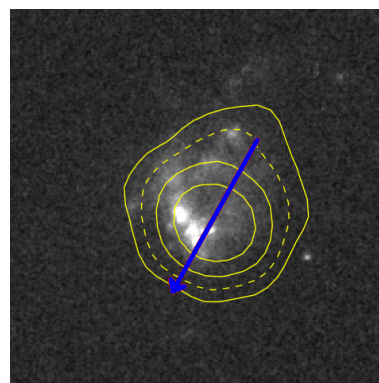
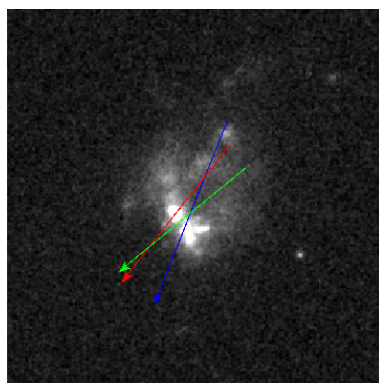
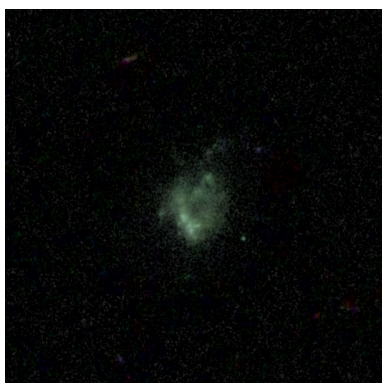
JClass: 3



Concordância: boa.

ID: 8616

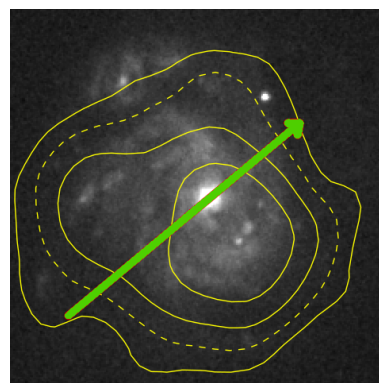
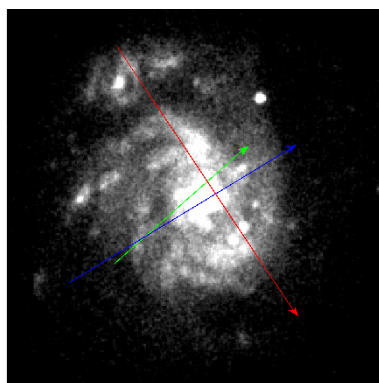
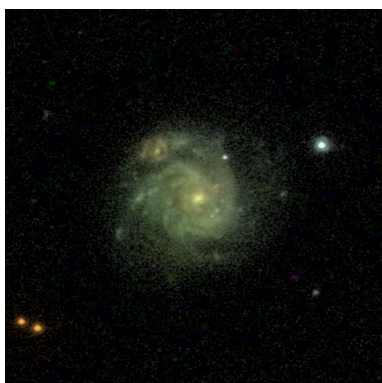
JClass: 4



Concordância: boa.

ID: 9524

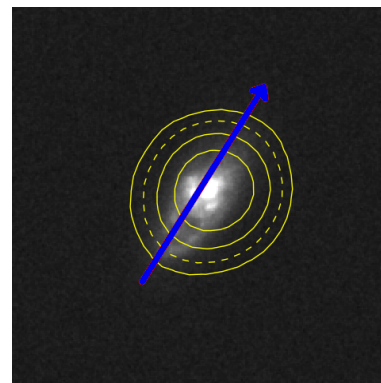
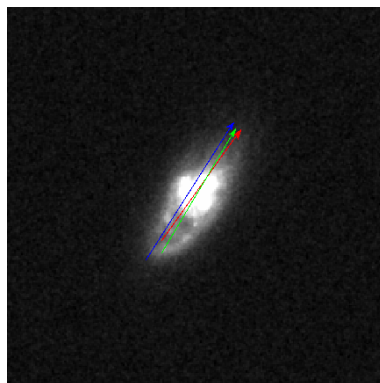
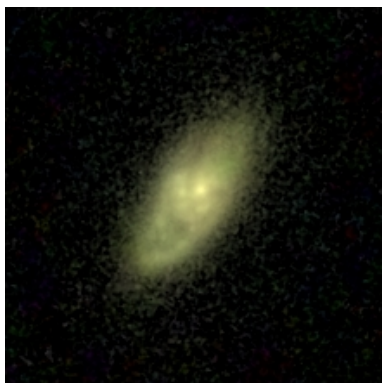
JClass: 5



Concordância: média.

ID: 10565

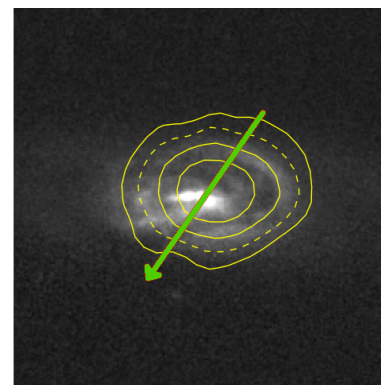
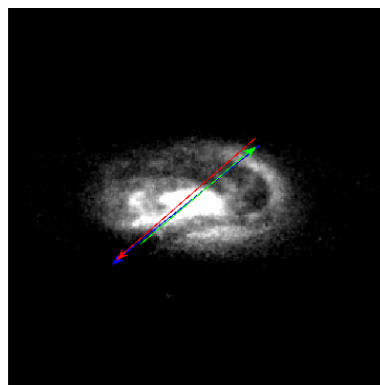
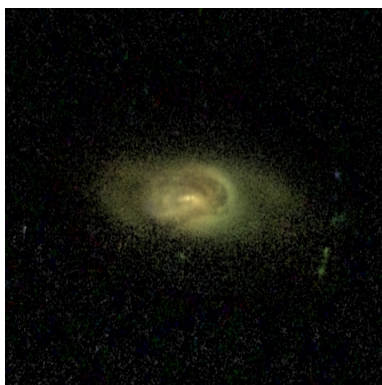
JClass: 3



Concordância: boa.

ID: 11633

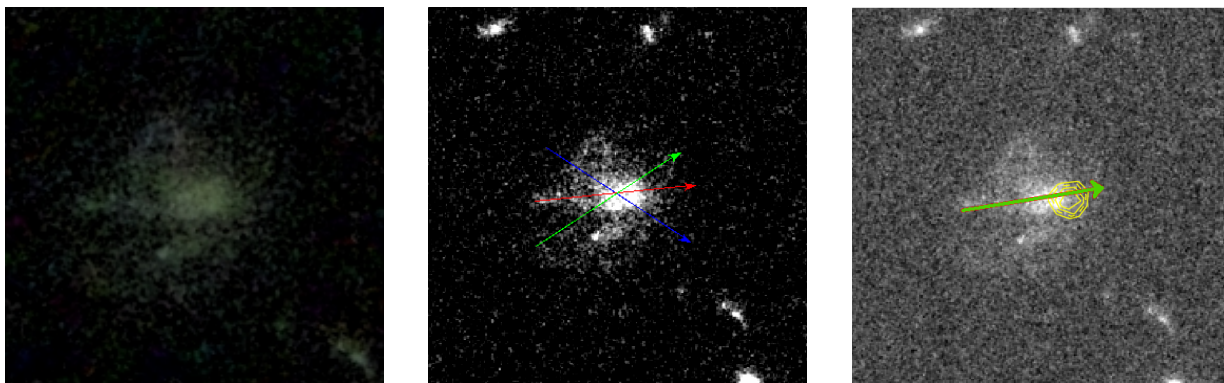
JClass: 3



Concordância: média.

ID: 11810

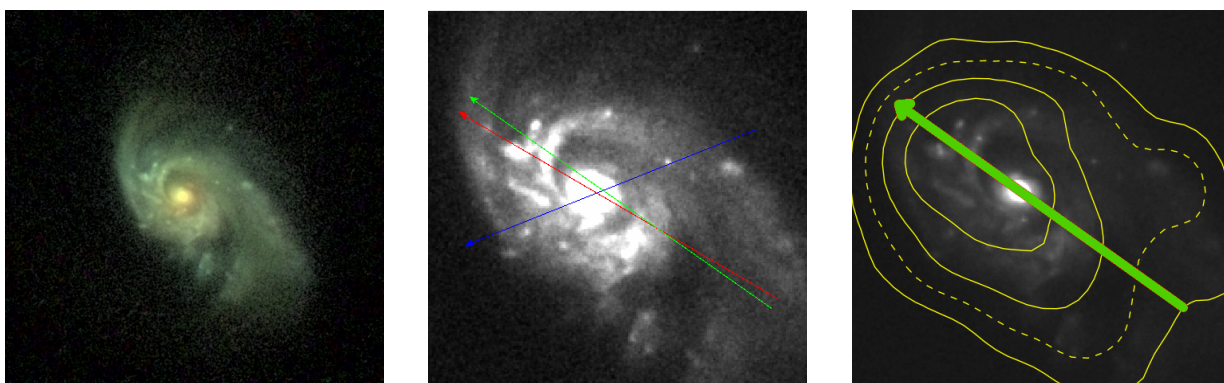
JClass: 3



Concordância: média.

ID: 11827

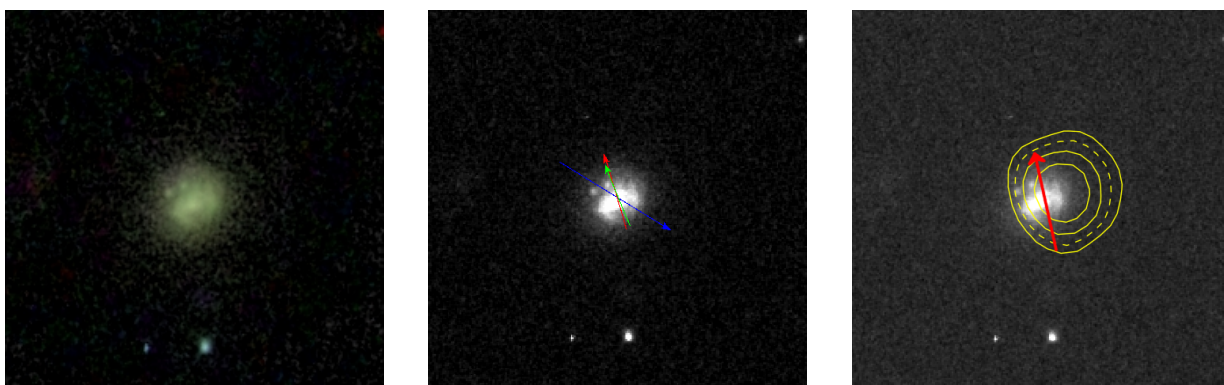
JClass: 3



Concordância: média.

ID: 12539

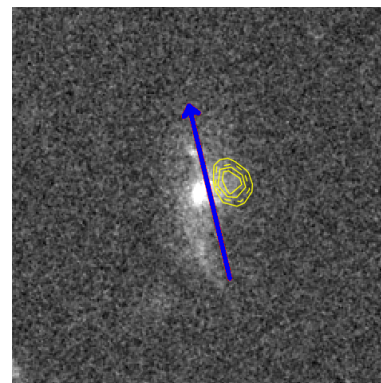
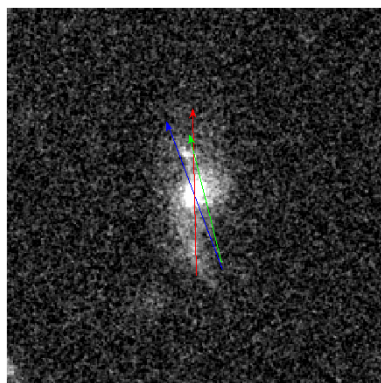
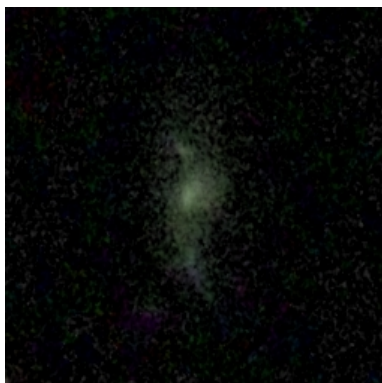
JClass: 3



Concordância: ruim.

ID: 13497

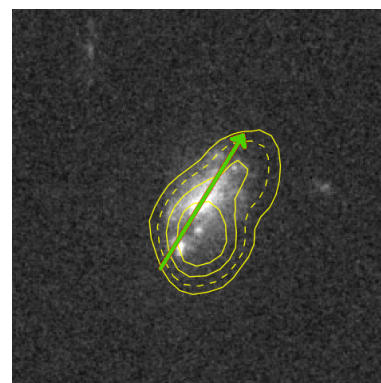
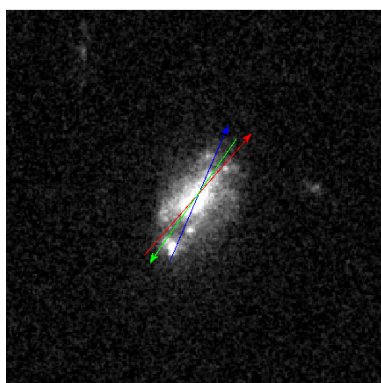
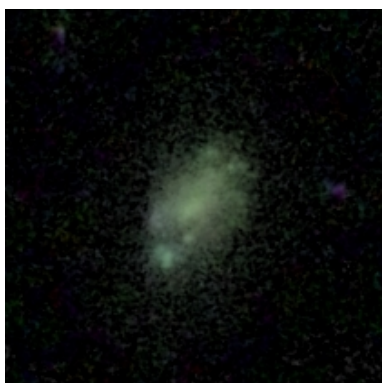
JClass: 3



Concordância: boa.

ID: 13806

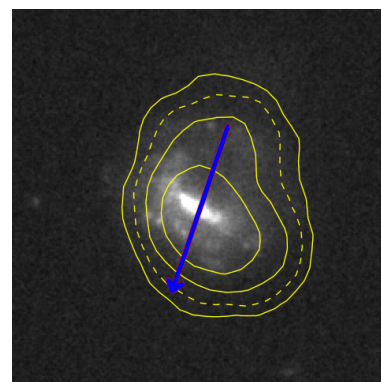
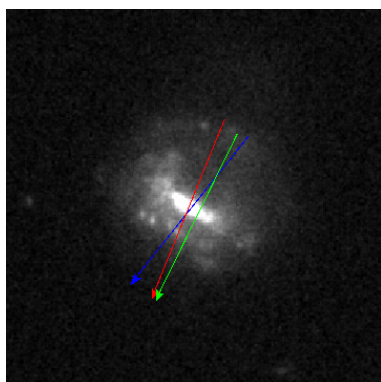
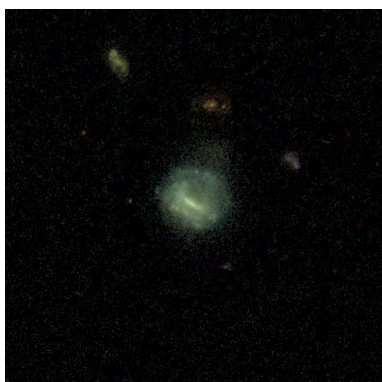
JClass: 3



Concordância: média.

ID: 13968

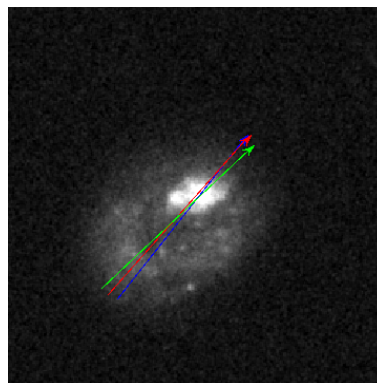
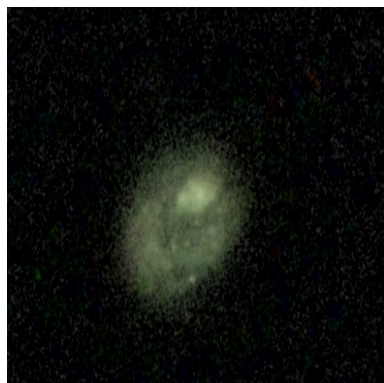
JClass: 4



Concordância: boa.

ID: 14385

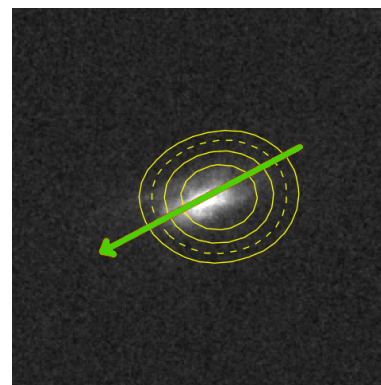
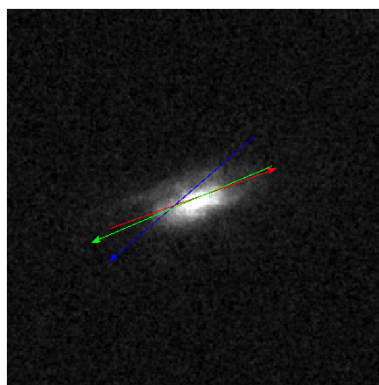
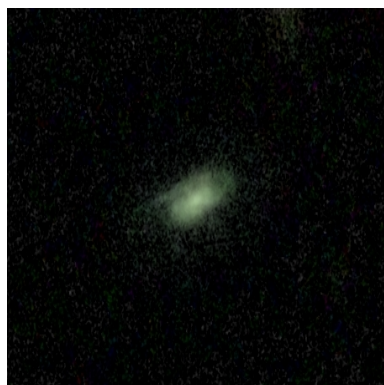
JClass: 4



Concordância: boa.

ID: 15732

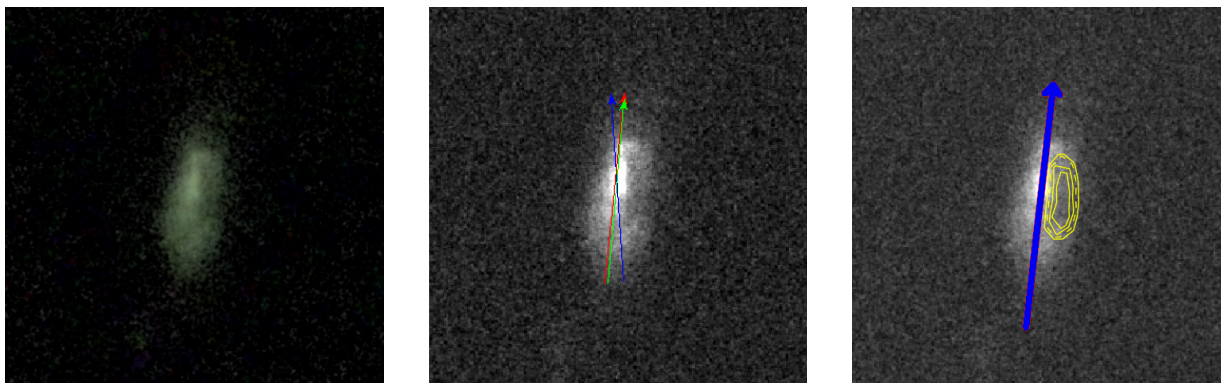
JClass: 3



Concordância: média.

ID: 17396

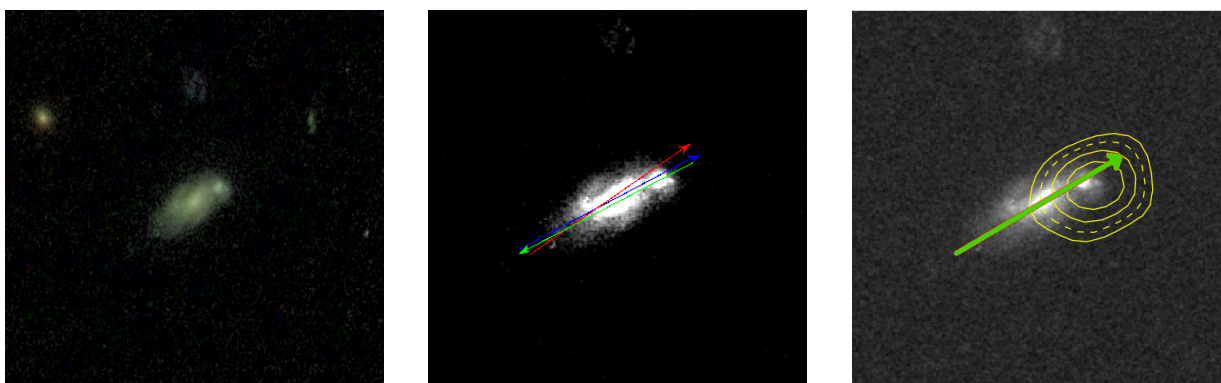
JClass: 4



Concordância: boa.

ID: 17464

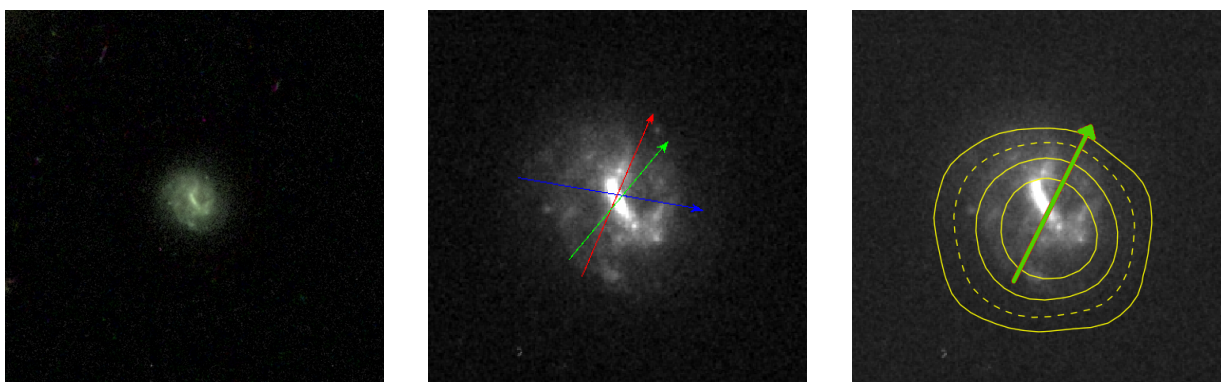
JClass: 3



Concordância: média.

ID: 17849

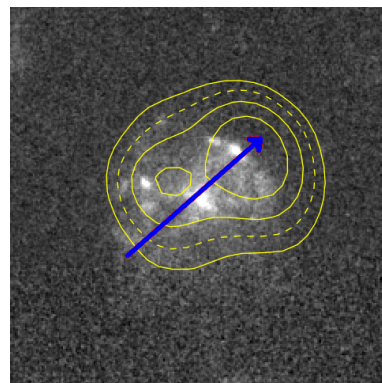
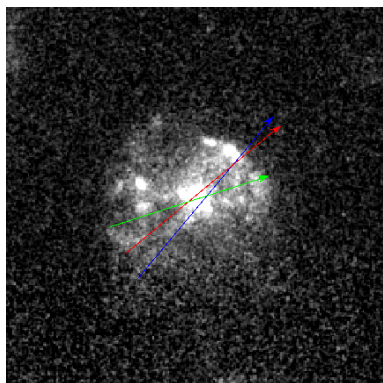
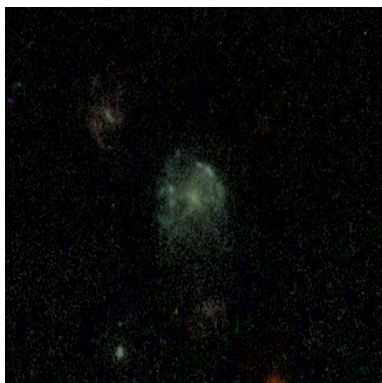
JClass: 4



Concordância: média.

ID: 17974

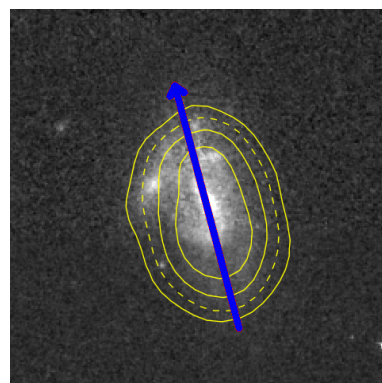
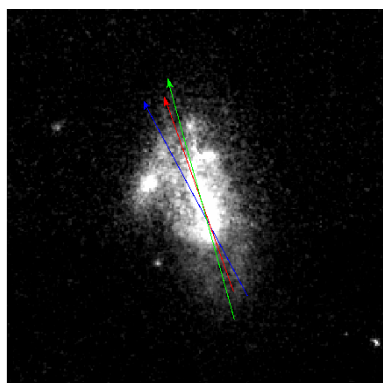
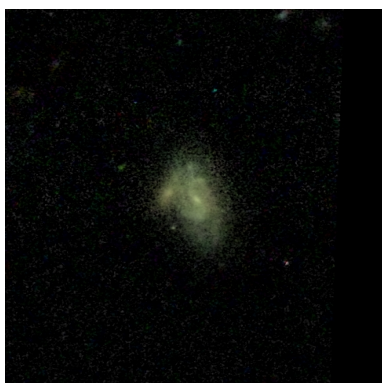
JClass: 3



Concordância: boa.

ID: 18385

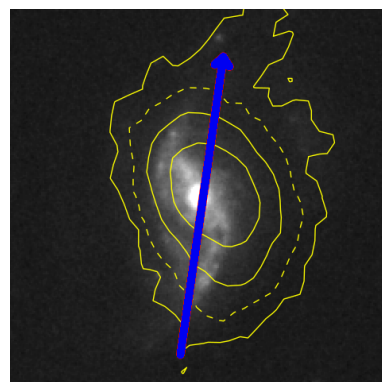
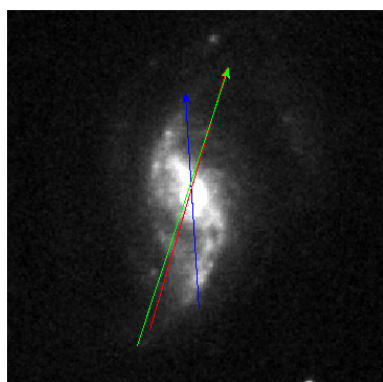
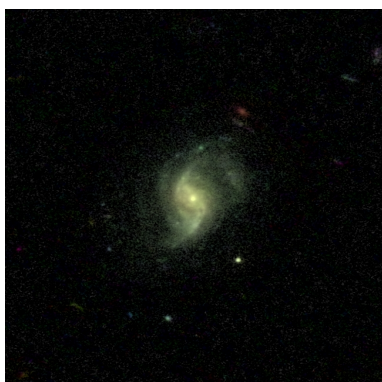
JClass: 3



Concordância: boa.

ID: 18509

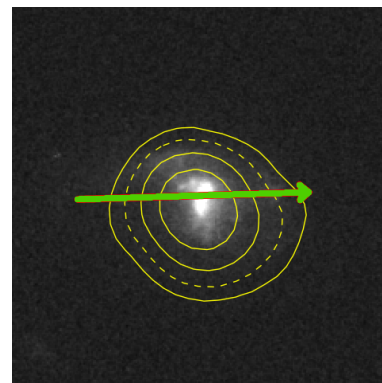
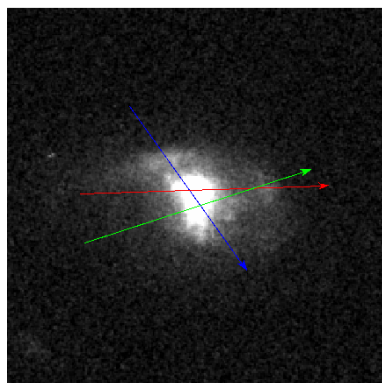
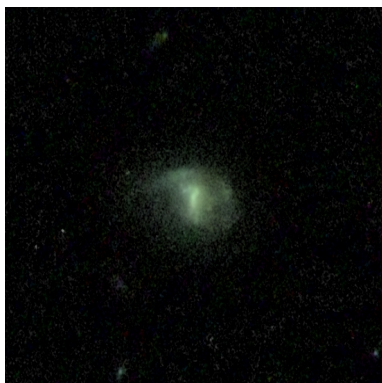
JClass: 3



Concordância: boa.

ID: 19675

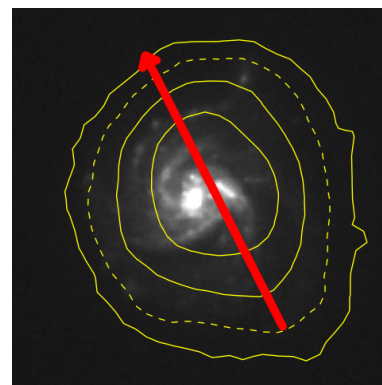
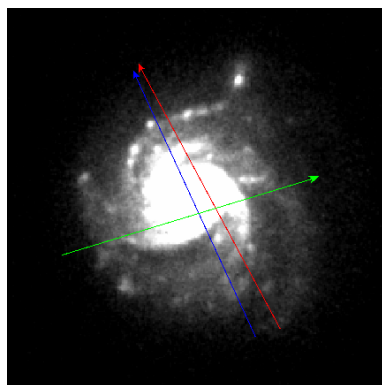
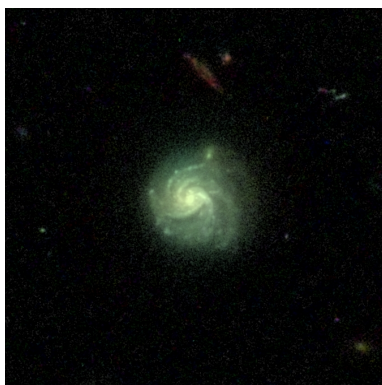
JClass: 3



Concordância: média.

ID: 19140

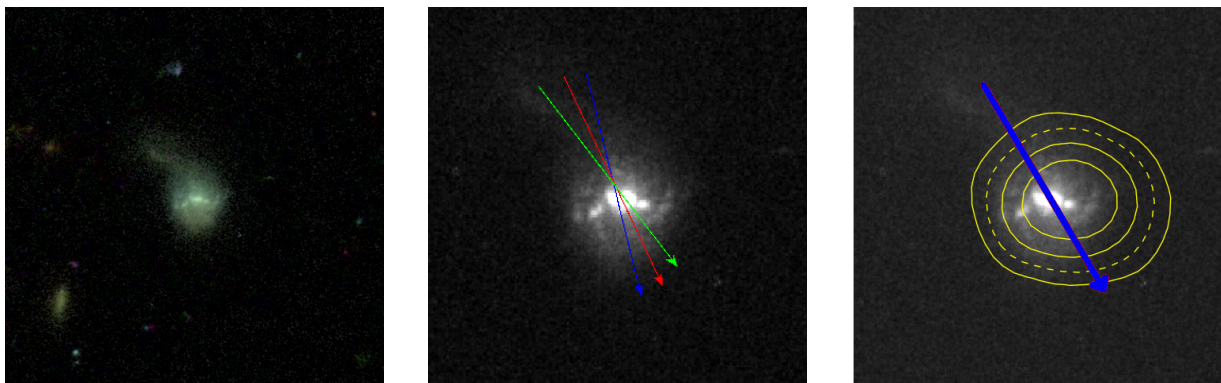
JClass: 4



Concordância: ruim.

ID: 20056

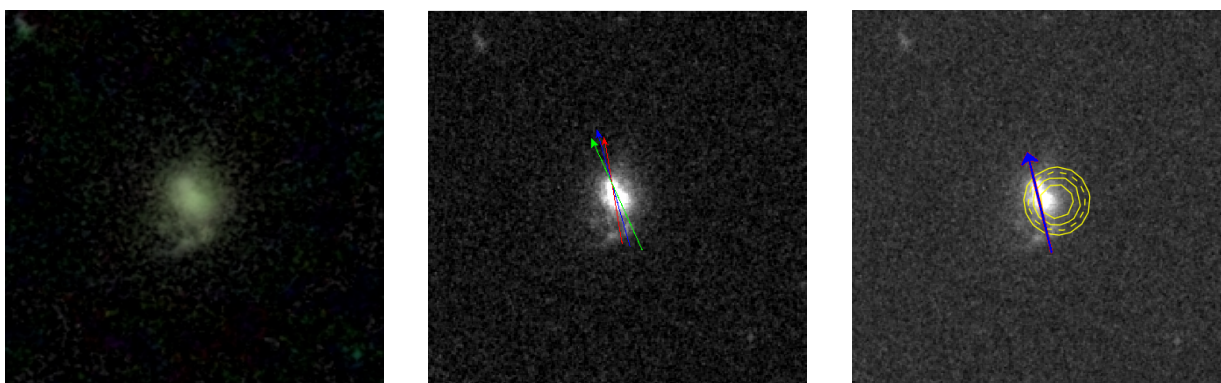
JClass: 4



Concordância: boa.

ID: 20100

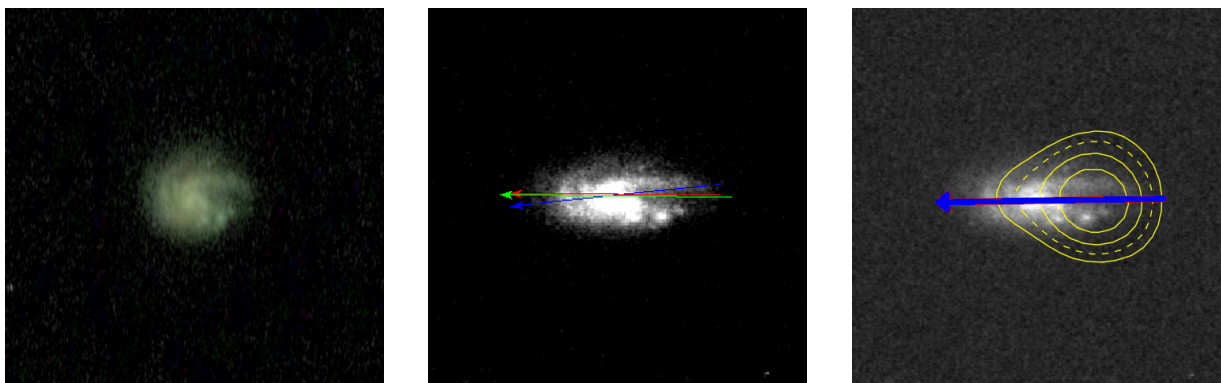
JClass: 3



Concordância: boa.

ID: 24529

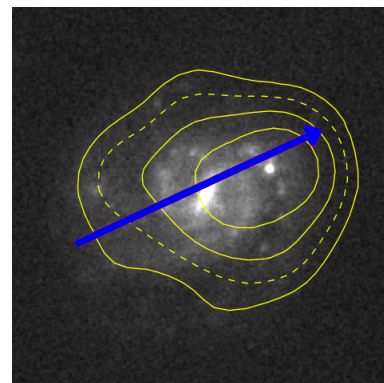
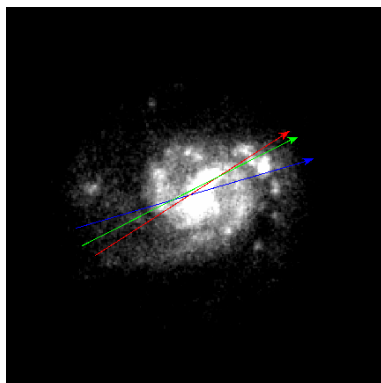
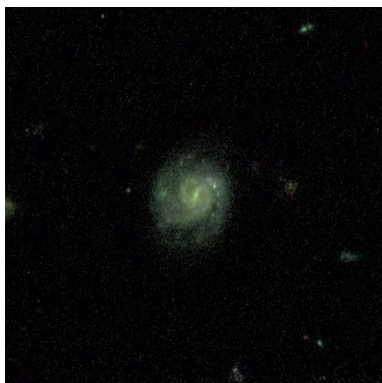
JClass: 3



Concordância: boa.

ID: 25122

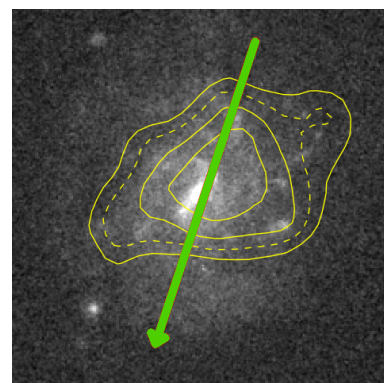
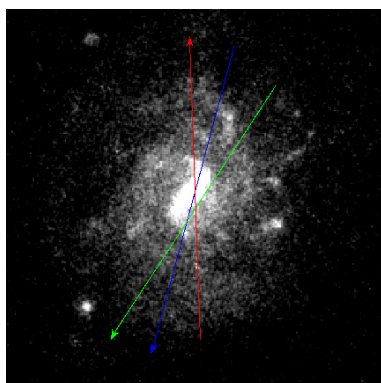
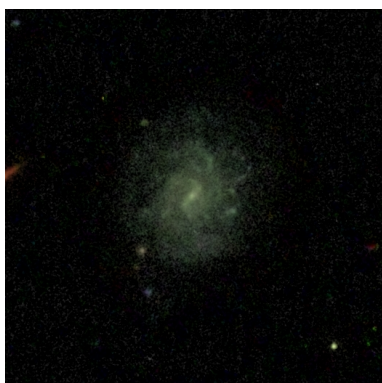
JClass: 3



Concordância: boa.

ID: 28780

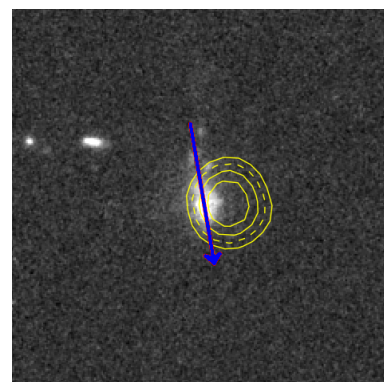
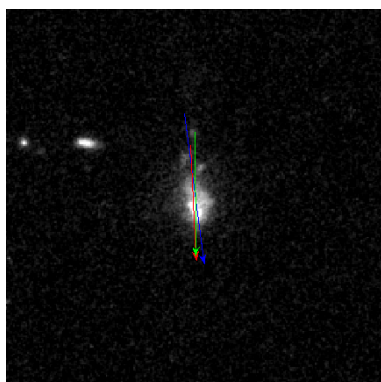
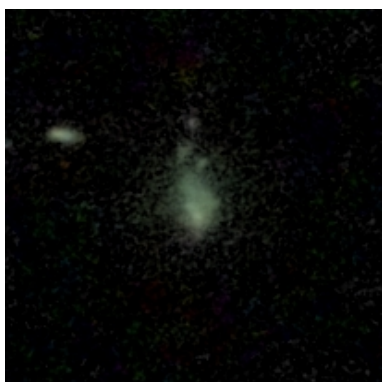
JClass: 3



Concordância: média.

ID: 29371

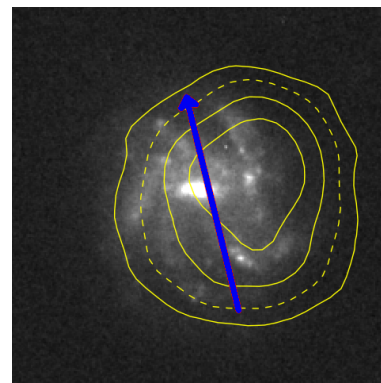
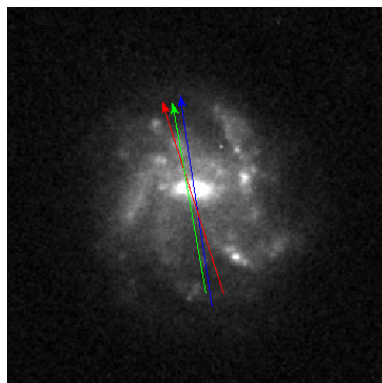
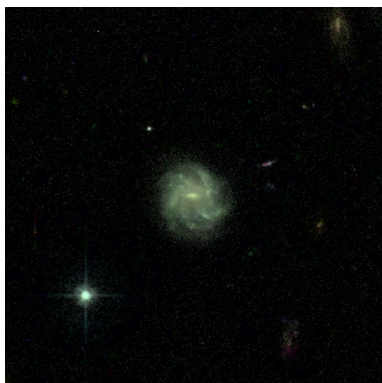
JClass: 3



Concordância: boa.

ID: 29826

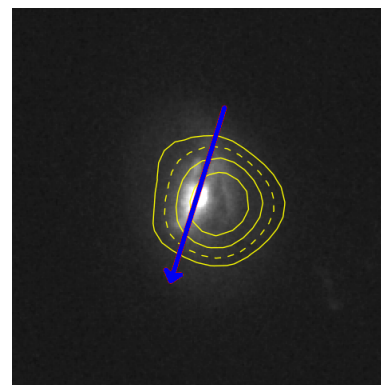
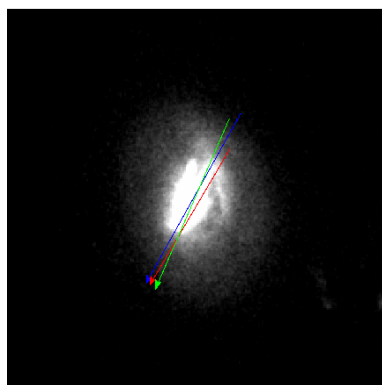
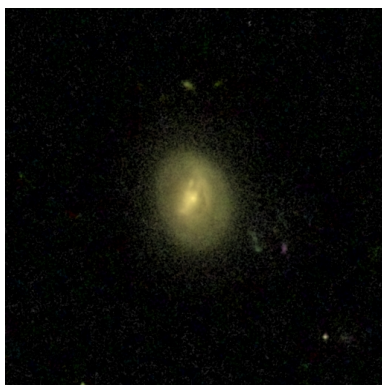
JClass: 4



Concordância: boa.

ID: 30604

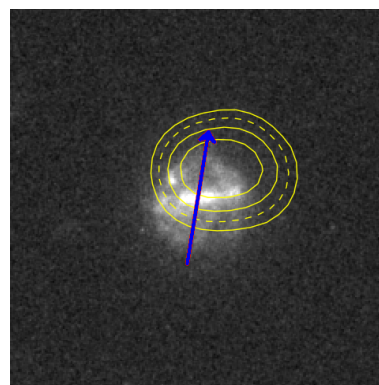
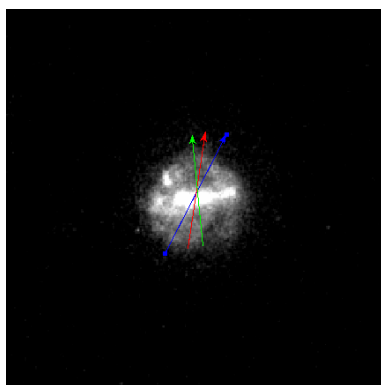
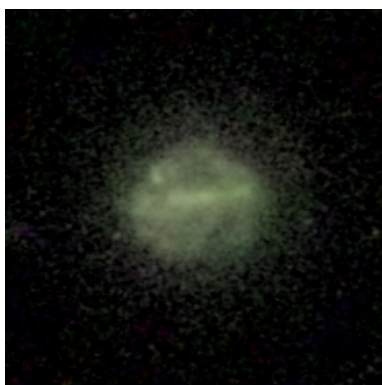
JClass: 3



Concordância: boa.

ID: 31084

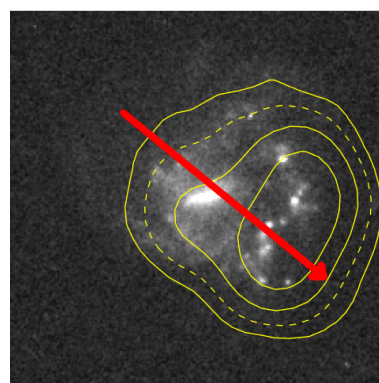
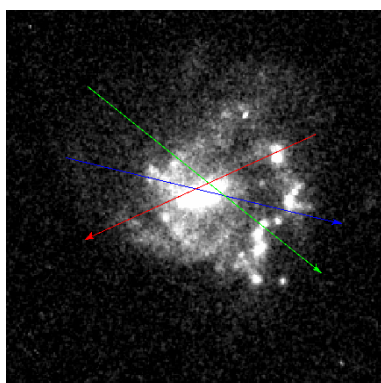
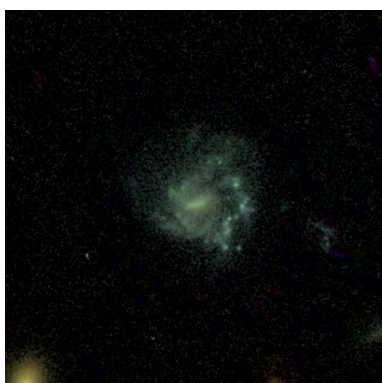
JClass: 3



Concordância: boa.

ID: 33534

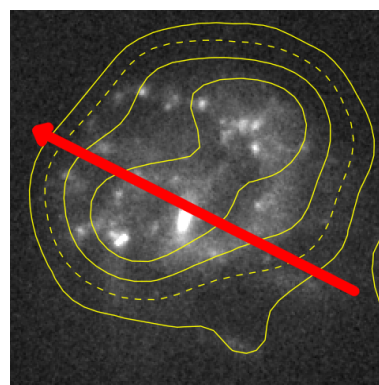
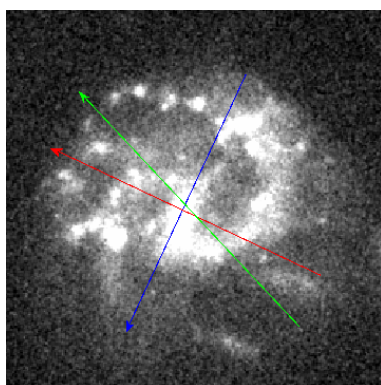
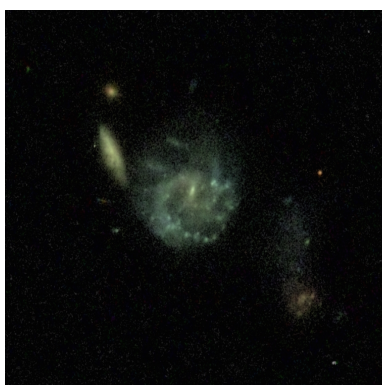
JClass: 5



Concordância: ruim.

ID: 35120

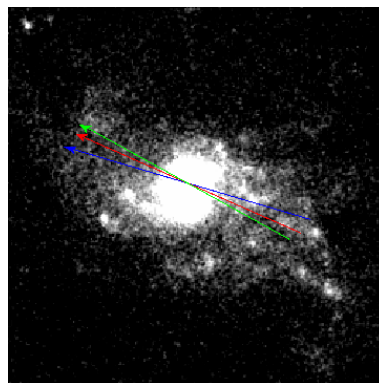
JClass: 4



Concordância: ruim.

ID: 35964

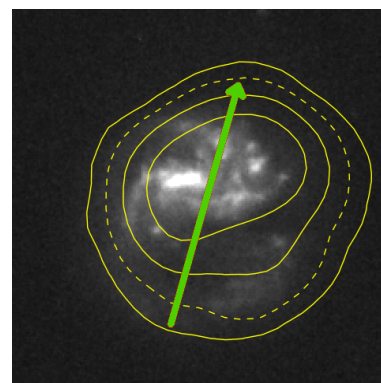
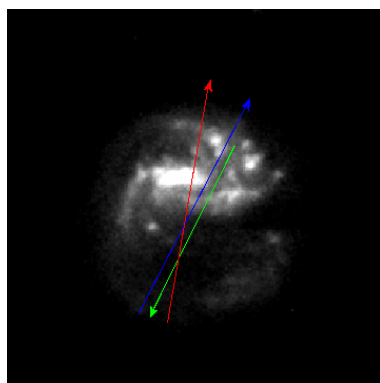
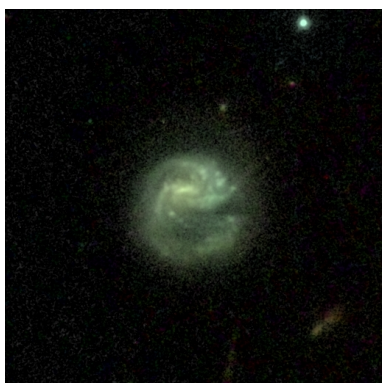
JClass: 4



Concordância: boa.

ID: 36376

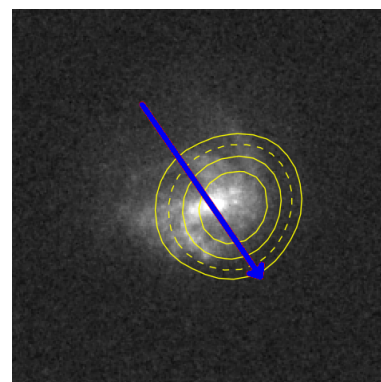
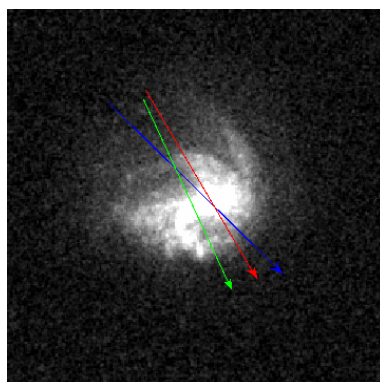
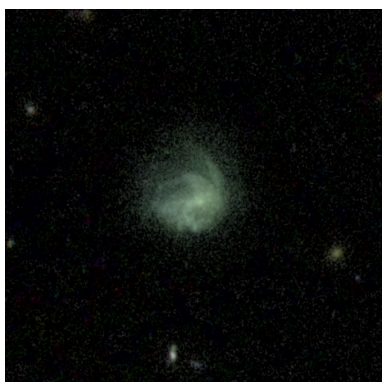
JClass: 4



Concordância: média.

ID: 40535

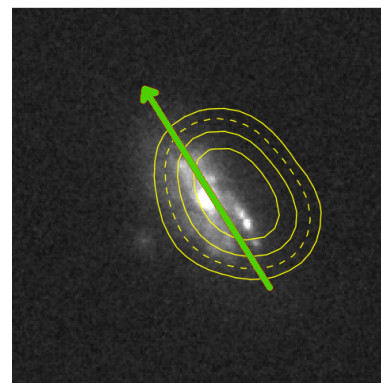
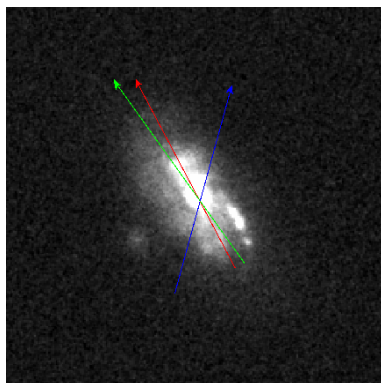
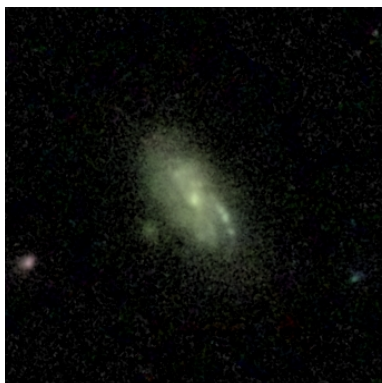
JClass: 4



Concordância: boa.

ID: 40968

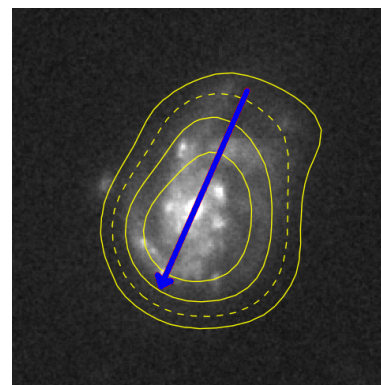
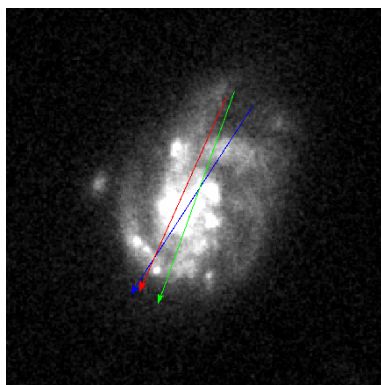
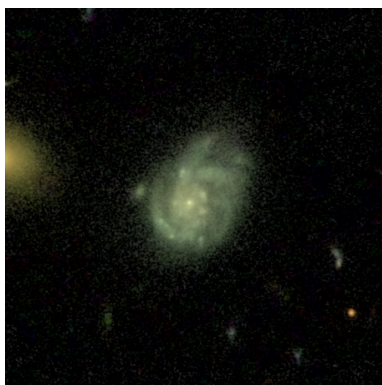
JClass: 3



Concordância: média.

ID: 42713

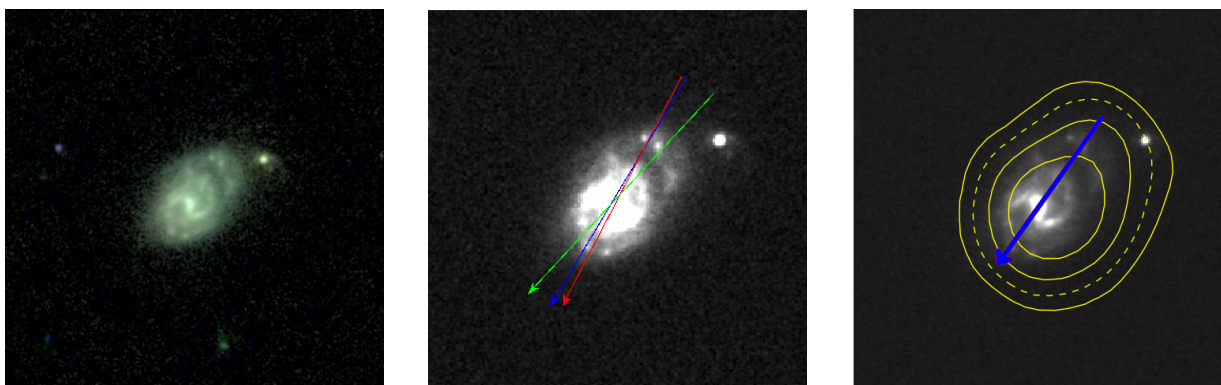
JClass: 5



Concordância: boa.

ID: 42742

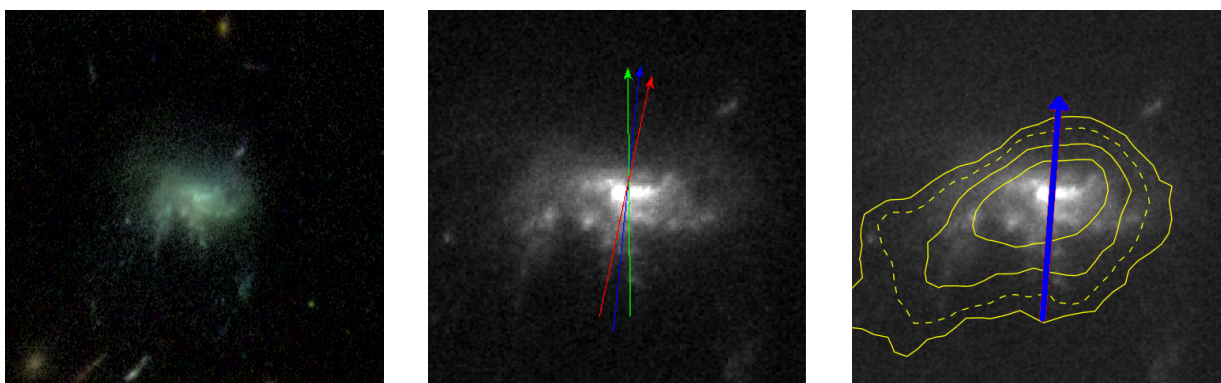
JClass: 4



Concordância: boa.

ID: 45301

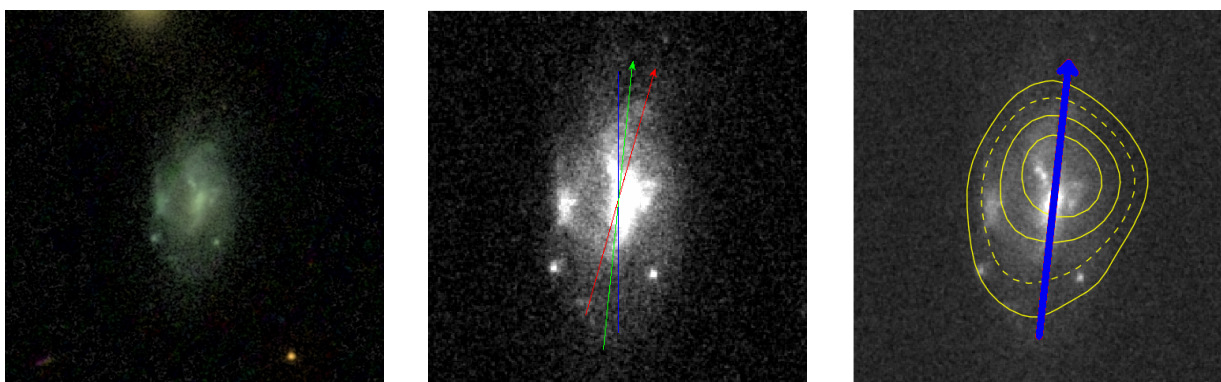
JClass: 5



Concordância: boa.

ID: 46664

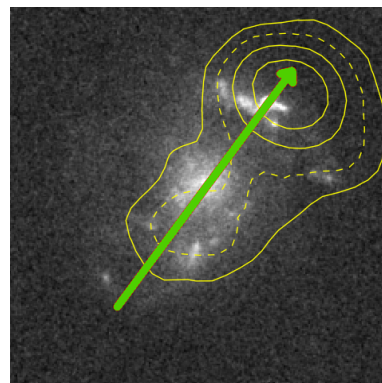
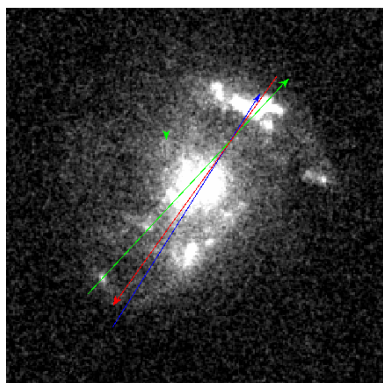
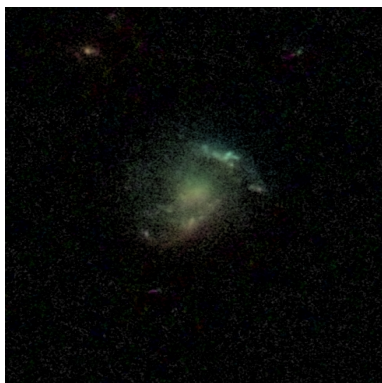
JClass: 3



Concordância: boa.

ID: 50962

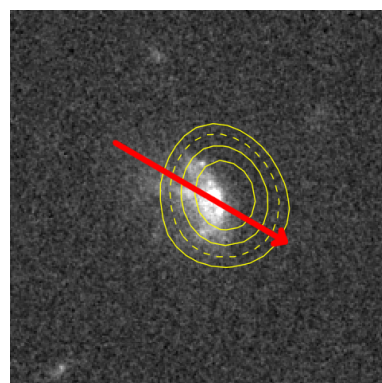
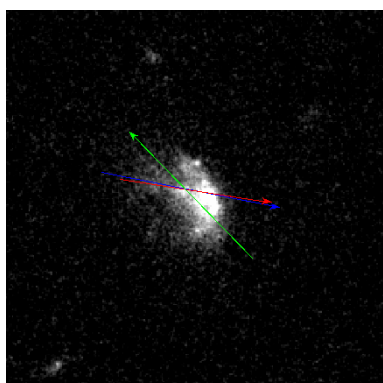
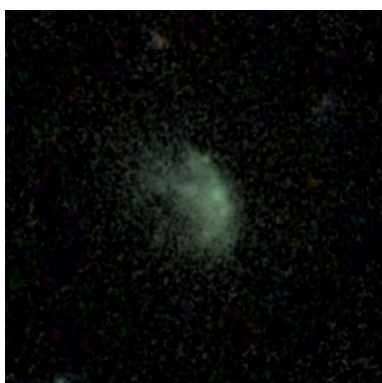
JClass: 3



Concordância: média.

ID: 55188

JClass: 3



Concordância: ruim.