

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Programa de Pós-Graduação em Física

Galáxias peculiares aneladas no S-PLUS

BÁRBARA ALVES LUNARTI VALADÃO

Itajubá

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

BÁRBARA ALVES LUNARTI VALADÃO

Galáxias peculiares aneladas no S-PLUS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física do Instituto de Física e Química da Universidade Federal de Itajubá como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Física. Área de concentração: Astrofísica extragaláctica.

Orientador: Dr. Hektor Sthenos Alves Monteiro

Itajubá

2024

Dedico este trabalho ao meu marido Victor.

“Na vastidão do espaço e na imensidão do tempo, é uma alegria compartilhar um planeta e uma época com você.” - Carl Sagan

Agradecimentos

Expresso meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho e para o meu desenvolvimento pessoal e profissional ao longo deste período. Primeiramente, sou imensamente grata ao meu marido, Victor, cujo apoio incondicional e companheirismo têm sido a base forte que me permite alcançar objetivos e superar desafios. Sua companhia e atenção são fontes de inspiração e força que me impulsionam a seguir em frente.

Agradeço profundamente também meu professor e orientador, Dr. Hektor Sthenos Alves Monteiro, pela orientação, inspiração, paciência e incentivo, cuja grande experiência e profissionalismo foram fundamentais para o desenvolvimento e realização desta pesquisa.

À Universidade Federal de Itajubá e ao Programa Institucional de Bolsa UNIFEI pela valiosa oportunidade de realizar este estudo e pelo suporte durante todo o processo.

Aos meus professores do Programa de Pós-Graduação em Física, pela troca de conhecimento, orientações e apoio, importantes em meu crescimento como pesquisadora.

Aos meus pais, que me ensinaram desde cedo o valor da educação e dedicação, pilares para minha jornada acadêmica; aos meus irmãos, que são meus amores e melhores amigos.

Este é o começo de uma jornada de aprendizagem e descobertas. Suas contribuições iluminaram meu percurso acadêmico e pessoal, tornando-o verdadeiramente significativo e inspirador.

*"All we have to decide,
is what to do with the time
that is given to us."*

J. R. R. Tolkien

Resumo

Apresentamos um estudo da fotometria de aberturas elípticas variáveis e abertura isofotal do Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS) para galáxias aneladas peculiares. Estes objetos fazem parte do grupo de galáxias irregulares e têm a aparência de um anel, resultado de uma colisão ou fruto de interações com o meio ou com outras galáxias. O estudo desses objetos traz informações sobre os processos interativos e evolutivos que algumas galáxias passam e regiões onde novas estrelas estão se formando após esse cenário. Analisamos a qualidade fotométrica do S-PLUS para nossa amostra de 117 galáxias aneladas peculiares, visto que possuem morfologia irregular, anéis extensos, interação em andamento ou efeitos de maré. Após a análise das aberturas para os objetos de nossa amostra, concluímos que os dados fotométricos do S-PLUS não são aplicáveis para todos. Desta forma, foi realizada uma inspeção individual, separando os objetos que possuem fotometria “confiável” dos que não possuem. Para os objetos de qualidade fotométrica, comparamos as medições das magnitudes e respectivos erros entre as três aberturas, analisando as dispersões e confiabilidade de valores, bem como a característica da distribuição espectral de energia. Para as galáxias cujas aberturas não abrangem toda sua extensão, temos apenas informações de suas partes separadas, sendo necessário refazer a fotometria para estes objetos.

Palavras-chave: galáxias aneladas. fotometria. aberturas elípticas. S-PLUS.

Abstract

We present a study of photometry using variable elliptical apertures and isophotal apertures from the Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS) for peculiar ringed galaxies. These objects belong to the group of irregular galaxies and have the appearance of a ring, resulting from a collision or interactions with the environment or other galaxies. The study of these objects provides information about the interactive and evolutionary processes that some galaxies undergo, as well as regions where new stars are forming following these events. We analyzed the photometric quality of S-PLUS for our sample of 117 peculiar ringed galaxies, as they exhibit irregular morphology, extensive rings, ongoing interaction, or tidal effects. After analyzing the apertures for the objects in our sample, we concluded that the photometric data from S-PLUS are not applicable for all of them. Therefore, an individual inspection was carried out, separating objects with "reliable" photometry from those without it. For the objects with photometric quality, we compared the magnitude measurements and respective errors between the three apertures, analyzing the dispersions and reliability of the values, as well as the characteristics of the spectral energy distribution. For galaxies whose apertures do not cover their entire extent, we only have information about their separate parts, making it necessary to redo the photometry for these objects.

Keywords: ring galaxies. photometry. elliptical apertures. S-PLUS.

Lista de abreviaturas e siglas

S-PLUS	Southern Photometric Local Universe Survey
AGN	Active Galactic Nucleus - galáxia de núcleo ativo
RG	Ring Galaxy - galáxia anelada
NRG	Normal Ring Galaxy - galáxia anelada normal
PRG	Peculiar Ring Galaxy - galáxia anelada peculiar
PGC	Principal Galaxies Catalogue
GALEX	Galaxy Evolution Explorer
NGC	New General Catalogue
RA	Right Ascension - ascensão reta
DEC	Declination - declinação
ADQL	Astronomical Data Query Language

Lista de ilustrações

Figura 1 – Componentes de uma galáxia espiral.	14
Figura 2 – Esquema de Hubble da classificação morfológica das galáxias.	15
Figura 3 – Galáxia elíptica NGC 2865 e galáxia lenticular NGC 4886.	15
Figura 4 – Galáxia espiral M101 e espiral barrada NGC 1365.	16
Figura 5 – Galáxia ARP 147 e galáxia NGC 5264.	18
Figura 6 – Interação entre galáxias.	19
Figura 7 – Exemplos de galáxias com núcleo ativo.	20
Figura 8 – Galáxia Cartwheel.	21
Figura 9 – Família dos anéis.	23
Figura 10 – Simulação vs. Observação.	24
Figura 11 – Simulação de partículas de teste.	25
Figura 12 – Estabilidade das órbitas em sistemas de anéis do tipo Hoag.	26
Figura 13 – Simulações cosmológicas de galáxias com anéis polares.	26
Figura 14 – Galáxia Cartwheel e sua interagente.	27
Figura 15 – Composição de imagens de Cartwheel.	28
Figura 16 – Galáxia Cartwheel vista com imagens no ultravioleta distante (FUV) obtidas pela missão AstroSat/UVIT, e RGB por HST/WFPC2 e VLT/MUSE.	29
Figura 17 – Espectro eletromagnético.	30
Figura 18 – Combinação de filtros para imagem da Nebulosa de Caranguejo.	31
Figura 19 – Exemplo de bandas estreitas combinadas com bandas largas.	32
Figura 20 – Fotometria das galáxias em interação NGC 7469 e IC 5283.	33
Figura 21 – Fotometria da RG polar NGC 4262.	34
Figura 22 – Comparação da SED observada de uma galáxia com a biblioteca do GalaPy.	35
Figura 23 – Área de cobertura do S-PLUS.	38
Figura 24 – Sistema de 12 filtros do S-PLUS.	38
Figura 25 – Detecção de uma fonte e parâmetros da elipse.	40
Figura 26 – Exemplo da abertura ISO para a galáxia AM 0034-351.	41
Figura 27 – Exemplo da abertura AUTO para a galáxia AM 0332-324.	42
Figura 28 – Exemplo da abertura PETRO para a galáxia AM 0420-440.	43
Figura 29 – Filtros individuais e combinados de AM 0035-335.	46
Figura 30 – Filtros individuais e combinados de AM 0417-391.	47
Figura 31 – Aberturas aplicadas à galáxia AM 0332-324.	48
Figura 32 – AM 0332-324: magnitudes em cada abertura para os 12 filtros.	48
Figura 33 – Exemplos de quando mais de uma abertura é aplicada em uma galáxia.	49
Figura 34 – Galáxia A 03364905 (Anon 0336-4905).	50
Figura 35 – Magnitudes da galáxia A 03364905 (Anon 0336-4905).	50

Figura 36 – Galáxia AM 0330-324.	51
Figura 37 – Magnitudes da galáxia AM 0330-324.	51
Figura 38 – Magnitudes da galáxia AM 0330-324.	52
Figura 39 – Magnitudes da galáxia AM 0330-324.	52
Figura 40 – Distribuição dos valores das magnitudes e respectivos erros pela representação gráfica <i>boxplot</i> e identificação de dados extrapolados para o filtro U.	53
Figura 41 – Visualização das três aberturas para todas as galáxias no filtro R.	54
Figura 42 – Visualização das três aberturas para todas as galáxias no filtro J0430.	54
Figura 43 – Visualização das três aberturas para todas as galáxias no filtro U.	54
Figura 44 – Comparação entre as aberturas para o filtro R.	55
Figura 45 – Comparação entre as aberturas para o filtro J0430.	56
Figura 46 – Comparação entre as aberturas para o filtro U.	57

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação dos anéis.	22
Tabela 2 – Sumário dos filtros do S-PLUS.	39
Tabela 3 – Lista de galáxias aneladas peculiares encontradas no S-PLUS.	64

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Astronomia extragaláctica	13
1.2	Galáxias peculiares aneladas	20
1.2.1	Morfologia peculiar	22
1.2.2	Estudo dos processos interativos	24
1.2.3	Observação de propriedades	27
1.3	Fotometria	30
1.4	Motivação e objetivos	35
2	Metodologia	37
2.1	Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS)	37
2.1.1	Instrumentação e ciência	37
2.1.2	Abertura ISO	40
2.1.3	Abertura elíptica variável AUTO	41
2.1.4	Abertura elíptica variável PETRO	42
2.2	Dados da amostra	43
3	Análise de Resultados	46
3.1	Fotometria das amostras	46
4	Considerações Finais	58
	Referências	60
	APÊNDICE A Lista da amostra	64
	ANEXO A Imagens da amostra	68
	ANEXO B Dados das aberturas	78
B.1	Comparação entre as aberturas	78
B.2	Amostra vista com os 12 filtros para as três aberturas	90

1

Introdução

Ao longo dos anos, os astrônomos achavam que o nosso planeta, as estrelas e alguns intrigantes corpos celestes observados no céu, chamados de “nebulosas”, constituíam nossa galáxia, a Via Láctea (expressão do grego helenístico *galaxias kuklos*, em português ciclo leitoso), e eram o Universo como um todo. No século XVIII, o filósofo alemão Immanuel Kant em sua obra *História Natural Universal e Teoria dos Céus* (Kant, 1755), propôs que estas nebulosas poderiam ser outros universos, denominadas *island universes* (em português universos ilhas). Essa expressão, também usada por Wright (1750) e Lambert (1761), seriam corpos não pertencentes à nossa galáxia, surgindo com a ideia da existência de outras galáxias, proposta que até então empiricamente não era comprovada. Muitas contribuições foram importantes para grandes questionamentos sobre a característica do nosso Universo, por exemplo, como os fenômenos observados no céu poderiam ser explicados. Em 1908, a astrônoma Henrietta Leavitt descobriu 1777 estrelas variáveis Cefeidas ao estudar as Nuvens de Magalhães, publicadas no *Annals of the Astronomical Observatory of Harvard College* (Leavitt, 1908), que são estrelas gigantes brilhantes do tipo pulsante periódica, em que a luminosidade varia de 0,1 a 2 magnitudes de acordo com o período, mostrando à comunidade acadêmica a relação período-luminosidade, para a determinação de distâncias. No início do século XX, o astrônomo estadunidense Slipher (1917) faz uma importante contribuição, descobrindo o espectro com desvio para o vermelho, ao observar e estudar os espectros das “nebulosas” espirais e encontrar suas medidas de velocidades radiais. Contudo, pode-se assumir que a astronomia extragaláctica teve um destaque e com isso a origem, a partir de 1920, quando a Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos realizou um debate, conhecido como o Grande Debate, para discutir a escala da Via Láctea e do Universo, e a natureza dessas “nebulosas”, se seriam objetos galácticos ou extragalácticos (Neto, 2022). Esse confronto de ideias foi resolvido quando Hubble, usando o telescópio de 2,5 metros de Mount Wilson e a relação período–luminosidade das estrelas Cefeidas proposta por Leavitt, estudou as estrelas de algumas “nebulosas espirais” e calculou suas respectivas distâncias em relação à Terra. O resultado desse estudo (Hubble, 1925) mostrou que as “nebulosas” estavam muito além da nossa galáxia e que esses sistemas possuíam grandes conjuntos de estrelas, e foram chamados de galáxias.

1.1 Astronomia extragaláctica

As galáxias, agora conhecidas como componentes do nosso Universo, são sistemas estruturados e gravitacionalmente ligados, compostos principalmente por inúmeras estrelas, planetas, gás, poeira, matéria escura e radiação (Milone et al., 2018). As populações estelares, introduzidas por Baade (1944), são os diferentes grupos de estrelas com características em termos de idade, composição química e localização na galáxia, que compartilham uma história evolutiva em comum (Choudhuri, 2010). Elas são classificadas em três categorias: população I, II e III. O estudo das populações estelares procura distinguir os componentes de uma galáxia e relacioná-los com estrelas das diferentes populações, para ilustrar a evolução das estrelas e das galáxias ao longo do tempo, desde as primeiras estrelas (primordiais) até as estrelas mais recentes, ricas em elementos mais pesados (Filho; Saraiva, 2023).

- População I: estas estrelas são relativamente jovens em termos astronômicos, com idades que geralmente variam de algumas dezenas de milhões a bilhões de anos. São ricas em elementos mais pesados (elementos acima do hélio (He)), como carbono, oxigênio, nitrogênio e metais em geral. Isso ocorre porque elas se formaram a partir de nuvens interestelares enriquecidas por gerações anteriores de estrelas. Geralmente, estão localizadas em regiões de alta atividade de formação estelar, como os braços espirais de galáxias como a nossa, a Via Láctea, ou em aglomerados abertos. O Sol é um exemplo de estrela da população I.
- População II: estas estrelas são mais antigas em comparação com a população I, com idades que podem variar de bilhões a dezenas de bilhões de anos. Elas possuem uma composição química mais simples, com menor abundância de elementos pesados, sendo estrelas pobres em metais. São comumente encontradas no halo das galáxias espirais, em elípticas e em aglomerados globulares.
- População III: esta população representa as primeiras estrelas a se formarem e evoluírem no universo, pouco depois do Big Bang, com idades estimadas em centenas de milhões de anos após o Big Bang. Seriam compostas principalmente por hidrogênio e hélio, pois teriam se formado antes de outras estrelas enriquecerem o meio interestelar com elementos mais pesados. Não há exemplos diretos de estrelas da população III observadas atualmente, visto que teriam sido estrelas de grande massa e teriam terminado suas vidas como remanescentes estelares, como buracos negros e estrelas de nêutrons.

Há diversos tipos e tamanhos de galáxias e para cada grupo semelhante, há componentes específicos que as caracterizam. Em geral, os componentes de uma galáxia consistem em uma região denominada de núcleo (ou bojo), onde há grande densidade de estrelas, e a região ao redor dele, que possui dentre estrelas e outros elementos (Figura 1).

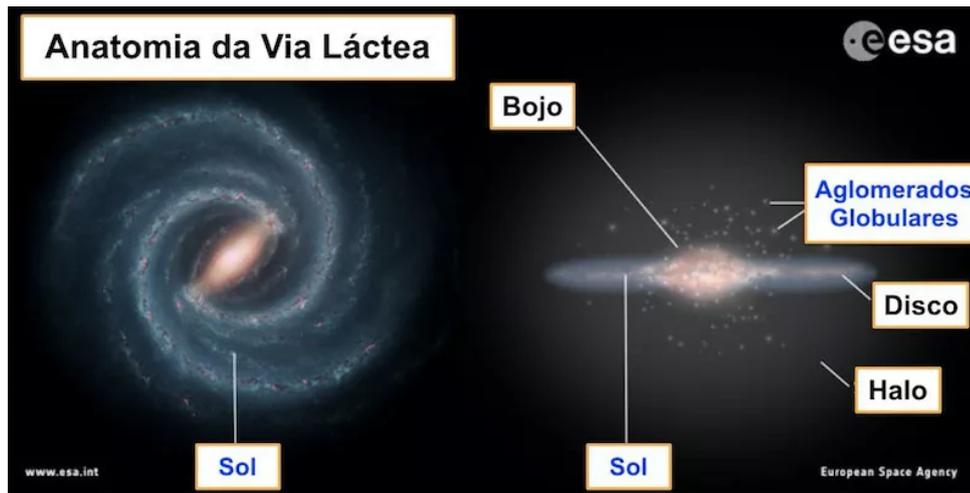


Figura 1 – Nesta imagem temos um exemplo dos componentes de uma galáxia espiral, como a nossa galáxia, a Via Láctea. O bojo possui uma grande densidade de estrelas e pode ser alongado ou arredondado; o disco possui estrelas, predominantemente jovens, que seguem uma onda de densidade responsável pela característica espiral; o halo é composto por gás interestelar pouco denso, estrelas mais velhas, aglomerados globulares e matéria escura. Créditos: NASA/JPL-Caltech e ESA/ATG medialab.

Mas, como surgem as galáxias e como evoluem? Mesmo que ainda discutido, acredita-se que locais com alta densidade de matéria escura e instabilidades gravitacionais podem favorecer a formação de galáxias (Riffel, 2018). Há duas hipóteses que surgiram na segunda metade do século passado sobre a origem e evolução das galáxias: a monolítica e hierárquica (Neto, 2022). No modelo monolítico, as galáxias teriam se formado e evoluído de forma isolada e pelo colapso de grandes nuvens de gás em contração, e dependendo das condições iniciais, densidade e momento angular da nuvem, diferentes tipos de galáxias surgiriam. Já no modelo hierárquico, as primeiras galáxias teriam se originado nos poços de potencial criados pela concentração de matéria escura, e as galáxias maiores e massivas, através de interações e fusões entre si. Contudo, alguns pontos em relação à formação de algumas estruturas continuam em estudo (Riffel, 2018), em virtude de que há semelhanças entre galáxias com histórias evolutivas possivelmente diferentes, tornando necessário o desenvolvimento de teorias que descrevam a acumulação de matéria para a origem destes objetos. Durante o processo de formação de uma galáxia, a riqueza de matéria bariônica (composta principalmente por prótons, nêutrons e elétrons) influencia suas propriedades, fazendo com que elas apresentem características distintas umas das outras (Santos, 2018).

Em 1936, Hubble (1936) descreve importantes análises e conclusões das palestras Silliman, na Universidade de Yale, e publica o livro *Realm of the Nebulae*¹, onde propõe uma classificação morfológica para as galáxias, conhecida como esquema de Hubble. A análise da morfologia das galáxias é importante para o estudo de sua estrutura, informações sobre a cinemática, regiões onde estrelas novas estão se formando e classificação de acordo com suas

¹ Livro baseado no esquema proposto por John Reynolds em *Photometric measures of the nuclei of some typical spiral nebulae*, em 1920.

semelhanças, identificando fases evolutivas e propriedades das populações estelares (estrelas jovens e velhas).

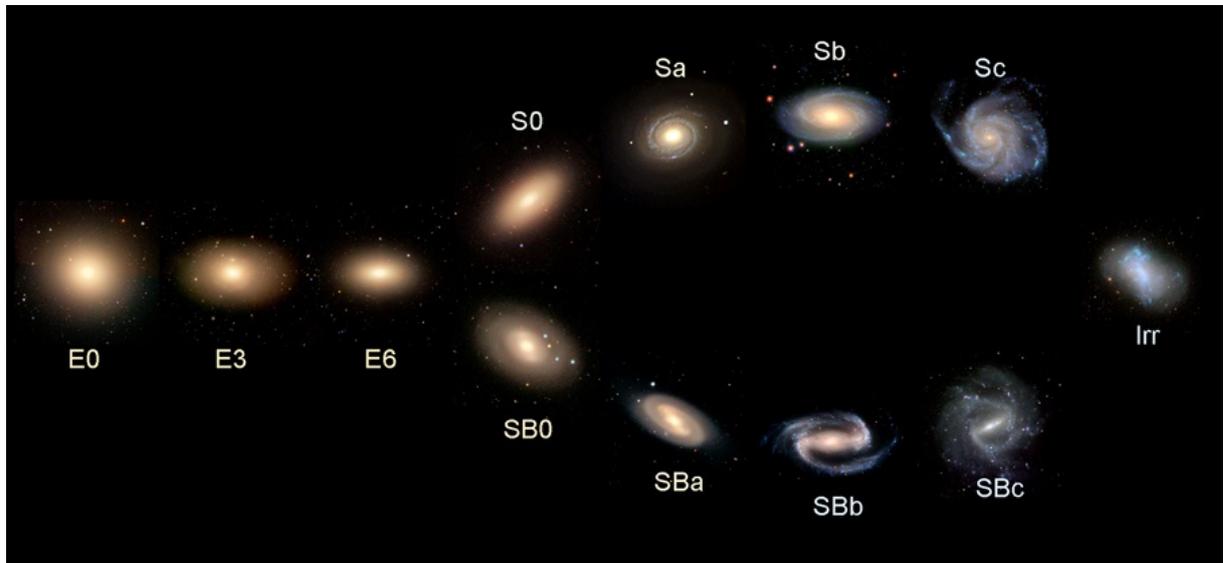


Figura 2 – Representação esquemática da classificação morfológica das galáxias. Créditos: Galaxy Zoo.

Neste esquema (Figura 2), não evolutivo, pioneiro de classificação morfológica, Hubble propôs três classes de galáxias: elípticas, espirais e irregulares. Nos anos seguintes, o esquema teve o acréscimo de mais duas classes, as lenticulares e espirais barradas.

As galáxias elípticas (E0 a E6, Figura 3) possuem formato esférico ou elipsoidal e tem como componentes o bojo e halo. A propriedade de achatamento em seu formato tendendo do circular ao elíptico é dada por En , em que n é a elipticidade projetada através da orientação dos planos de simetria ($n = 10(1 - b/a)$, b/a sendo a razão entre os eixos menor (b) e maior (a) da elipse), que determina sua classificação entre E0 a E6. Uma galáxia elíptica perfeitamente circular será uma E0, enquanto que a mais achatada, uma E7. Elas não possuem “braços espirais”, e ao longo de sua estrutura, há baixas concentrações de gás, poeira e estrelas jovens.



Figura 3 – A galáxia elíptica NGC 2865, à esquerda, está localizada a 100 milhões de anos-luz de distância. A galáxia lenticular NGC 4886, à direita, possui principalmente estrelas antigas, mas não braços espirais. Créditos: ESA/Hubble & NASA.

As elípticas possuem uma grande densidade de estrelas que diminui conforme a distância da região central do bojo, principalmente estrelas antigas, e variam amplamente em tamanho, desde as gigantes, com diâmetros de milhões de anos-luz e massas de até 10 trilhões de massas solares, até as anãs, com diâmetros de apenas alguns milhares de anos-luz.

As galáxias lenticulares (S0 e SB0, Figura 3) possuem morfologia intermediária entre uma elíptica e espiral, com um formato de disco (o disco, fundamental nas galáxias espirais e lenticulares, é a região plana que compõe a parte principal e mais visível da galáxia, responsável pela maior parte da massa e da atividade estelar observada), bojo com concentração de estrelas, porém com ausência de espiras (Riffel, 2018; Neto, 2022; Filho; Saraiva, 2023).

As galáxias espirais (Figura 4), quando vistas de frente (em relação ao ângulo de visada da Terra), apresentam uma clara estrutura espiral (as “espiras” são ondas de densidade que se propagam através do disco galáctico, compostas principalmente por estrelas, gás e poeira interestelar), diferem entre si conforme o tamanho e formato do bojo e ao nível de desenvolvimento das espiras. Estas galáxias apresentam um formato discoidal onde se estendem as espiras, halo (região estendida e difusa que envolve o disco principal da galáxia, composto principalmente por estrelas antigas, gás difuso, matéria escura e aglomerados globulares), braços espirais (onde há muitas estrelas jovens, pois à medida que o material interestelar passa por essas ondas de densidade, ele é comprimido e desencadeia a formação de novas estrelas), e bojo, podendo ser este barrado ou normal.



Figura 4 – Galáxia espiral M101, à esquerda, conhecida como galáxia Pinwheel, está localizada a cerca de 27 milhões de anos-luz de distância na direção da constelação Ursa Maior. Créditos: Hubble Image: NASA, ESA, K. Kuntz (JHU), F. Bresolin (University of Hawaii), J. Trauger (Jet Propulsion Lab), J. Mould (NOAO), Y.-H. Chu (University of Illinois, Urbana) e STScI; CFHT Image: Canada-France-Hawaii Telescope/J.-C. Cuillandre/Coelum; NOAO Image: G. Jacoby, B. Bohannan, M. Hanna/NOAO/AURA/NSF. A galáxia espiral barrada NGC 1365, à direita, localizada na constelação de Fornax, possui colorações azuis, regiões onde estrelas acabaram de se formar. Créditos: ESA/Hubble & NASA.

Galáxias espirais normais (Sa a Sc), possuem núcleo com formato esférico e suas espiras partem tangencialmente desse núcleo em posições opostas. A classificação Sa a Sc varia conforme

o tamanho do núcleo em relação à galáxia e o grau de desenvolvimento das espiras. Por exemplo, uma galáxia Sa é uma espiral com núcleo grande e braços espirais pequenos, bem enrolados, de difícil resolução. Por outro lado, as galáxias Sb têm braços espirais mais soltos, o núcleo é de tamanho moderado, menor do que o das Sa, e contêm mais gás e poeira, promovendo uma maior formação estelar. As galáxias Sc apresentam braços espirais muito soltos e proeminentes, núcleo pequeno e menos luminoso, e o conteúdo de gás e poeira é alto, favorecendo a formação de muitas estrelas novas (Filho; Saraiva, 2023; Neto, 2022).

Galáxias espirais barradas (SBa a SBc) apresentam um núcleo estruturado em forma de “barra” (estrutura alongada) e braços espirais, que comumente, partem das extremidades da barra. A segmentação de *a* a *c* segue a lógica anterior: SBa possuem braços espirais bem apertados e uma barra proeminente; SBb braços espirais moderadamente soltos e uma barra bem definida; e SBc braços espirais muito soltos e uma barra relativamente menor em proporção ao tamanho da galáxia. Geralmente se observa nos braços das galáxias espirais, o material interestelar, como nebulosas² gasosas, poeira, e estrelas jovens (responsáveis pela tonalidade azulada) (Filho; Saraiva, 2023).

Ao analisar a idade das estrelas mais velhas em galáxias elípticas, observa-se que elas possuem, aproximadamente, a mesma idade das estrelas mais velhas das galáxias espirais, concluindo que ambos os tipos de galáxias tenham se originado na mesma época, quando a idade do universo era próxima de 1 bilhão de anos (Saraiva; Filho; Müller, 2023), e não uma sequência evolutiva espiral-elíptica.

O que determina a característica das estrelas de uma galáxia elíptica, predominantemente mais velhas, é que estas galáxias, em sua “juventude”, tenham formado suas estrelas em um curto período de tempo, consumindo rapidamente grande parte de seu gás, enquanto que nas espirais, a taxa de formação estelar teria sido mais demorada, preservando parte de seu gás, e portanto, promovendo a criação de novas estrelas por mais tempo. Hubble chamou as galáxias elípticas de “primitivas” e as espirais de “tardias” (Neto, 2022; Choudhuri, 2010).

O quinto tipo morfológico de galáxias, inclusive bem diversificado, são as irregulares (Irr). Como o próprio nome define, estas galáxias possuem uma estrutura peculiar, e geralmente, encontram-se junto a outras galáxias.

As galáxias irregulares (Figura 5) apresentam uma distribuição de luminosidade sem um padrão, nuvens de gás ionizado distribuídas irregularmente, geralmente intensa taxa de formação estelar, e são classificadas em dois tipos, Irregular I e Irregular II. O tipo Irr I, é o mais comum dos sistemas irregulares, possuem riqueza em gás e muitas estrelas jovens, enquanto que Irr II tem maior quantidade de poeira, são mais raras e vermelhas (Soares, 2009; Neto, 2022).

Essas morfologias irregulares podem ser provocadas por perturbações, deformações e

² Grandes nuvens de gás e poeira interestelar no espaço, que podem ser encontradas tanto dentro quanto fora de galáxias.

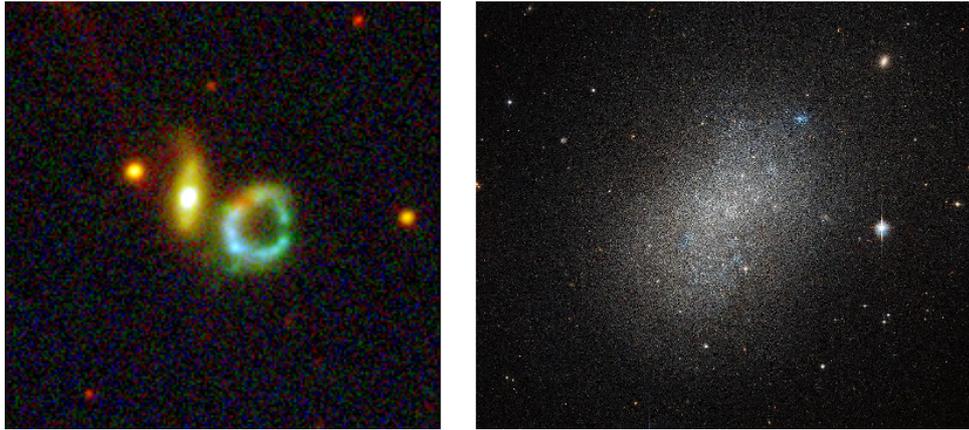


Figura 5 – A galáxia irregular ARP 147, à esquerda, peculiar do tipo anelada. Crédito: Southern Photometric Local Universe Survey. A galáxia NGC 5264, à direita, irregular e anã. Créditos: ESA/Hubble & NASA.

interações gravitacionais, como colisões (galáxia-galáxia), distorções de marés e canibalismo galáctico (fusão) (Saraiva; Filho; Müller, 2023; Neto, 2022), como ilustra a Figura 6.

- Colisões: As colisões entre galáxias são mais frequentes em aglomerados do que em regiões menos densas. Essas colisões potencialmente provocam mudanças na estrutura das galáxias interagentes, aumento de formação estelar e atividade nuclear, podendo ocorrer de forma lenta (galáxias que se movem mais lentamente - velocidade orbital menor) resultando em uma fusão, ou rápida (galáxias que se movem mais rápido - velocidade orbital maior) provocando perturbações morfológicas (Saraiva; Filho; Müller, 2023).
- Efeito de maré: Tende a deformar as galáxias que passam próximas entre si, puxando material galáctico, alongando-as, e a distribuição do material ao longo da interação é em parte, reflexo da conservação do momento angular (rotação) das galáxias antes do choque. Esse material composto por poeira, gás, matéria escura e estrelas, ao ser arrancado de uma galáxia (efeito *tidal stripping*), se estende em formato de filamento, que se denomina cauda de maré (Filho; Saraiva, 2023; Saraiva; Filho; Müller, 2023).
- Fusão: Refere-se à interação entre galáxias de tamanhos semelhantes em que uma incorpora o material da interagente, modificando sua estrutura. No entanto, quando uma galáxia maior interage com uma menor, as forças de maré da maior podem destruir a menor, processo chamado de “canibalismo galáctico” (Saraiva; Filho; Müller, 2023).

Durante o processo evolutivo, ocorrem colisões de vários tipos entre galáxias. Grupos e aglomerados de galáxias são influenciados pela força gravitacional dos componentes próximos, o que pode levar à fusão das galáxias, formando galáxias gigantes.

As interações entre as galáxias podem também direcionar grande quantidade de gás para a região central, propiciando a criação de um buraco negro (objeto extremamente compacto

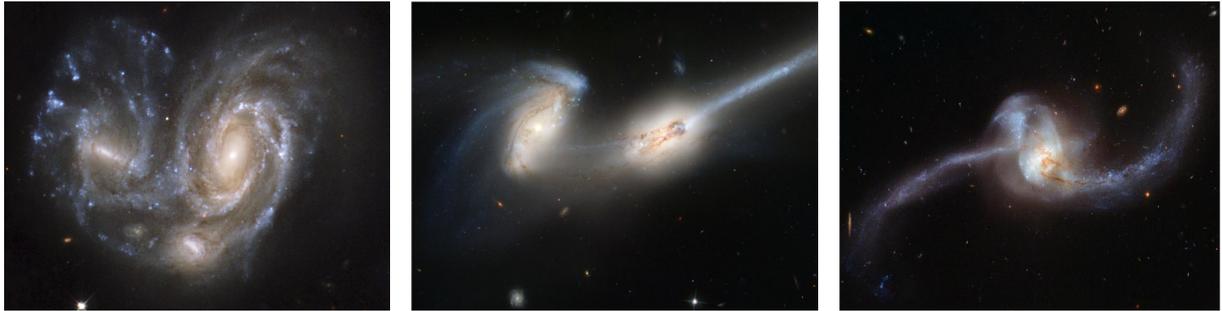


Figura 6 – Esquerda: Colisão: NGC 6050 e IC 1179 são duas galáxias espirais que pelo processo de colisão, estão ligadas pelos seus braços espirais. Créditos: NASA, ESA, the Hubble Heritage (STScI/AURA) Hubble Collaboration, and K. Noll (STScI); Meio: Efeito de maré: observa-se as caudas longas de maré criadas nas galáxias espirais NGC 4676A e NGC 4676B, pela diferença relativa entre as forças gravitacionais nas partes próximas e distantes de cada uma. Créditos: ACS Science & Engineering Team, NASA Hubble Space Telescope; Direita: Fusão: NGC 2623 se encontra no estágio final da fusão, onde se observa grande taxa de formação estelar pelas cores das estrelas e também o efeito das caudas de maré estendidas. Créditos: ESA/Hubble e NASA.

resultado do colapso de uma estrela massiva devido à força de sua própria gravidade) (Wuensche, 2003). Existem algumas galáxias que possuem um núcleo galáctico ativo (AGN, sigla do inglês Active Galactic Nucleus), onde uma quantidade significativa de energia é emitida a partir de uma região compacta no centro da galáxia, que não são estrelas ou poeira interestelar, mas processos envolvendo buracos negros supermassivos, que absorvem gás de estrelas vizinhas, liberando energia potencial na forma de radiação. Elas são divididas em quasares, rádio-galáxias, blazares, Seyfert, LINERs (linha de emissão nuclear de baixa ionização, do inglês, *low-ionization nuclear emission-line*), BL Lacertae e OVV (variável opticamente violento, do inglês, *optically violent variable*) de acordo com sua aparência e natureza da radiação que emitem (Neto, 2022).

Os quasares, ou fontes de rádio quase-estelares, são objetos extremamente luminosos e distantes no universo, considerados como galáxias jovens que têm no seu centro buracos negros com massas de 1 milhão a 1 bilhão de vezes a massa do Sol (Saraiva; Filho; Müller, 2023).

A luminosidade intensa dos quasares pode ser devido a contração do gás que sobrou após o processo de formação da galáxia, estrelas supermassivas girando a enormes velocidades e possuindo um campo magnético intenso ou mesmo buracos negros gigantes no núcleo de uma galáxia, especialmente em forma de luz visível, raios-X, e rádio (a Figura 17 exhibe os tipos de luz (radiação eletromagnética)) (Wuensche, 2003).

As rádio-galáxias, semelhante aos quasares, são galáxias que emitem grandes quantidades de ondas de rádio, geralmente têm a aparência de uma galáxia elíptica grande, mas, observadas em rádio, apresentam uma estrutura dupla com dois lóbulos emissores, que são grandes estruturas de matéria, podendo ser maiores que a própria galáxia hospedeira. Outra característica das rádio-galáxias é a presença de um jato de matéria que sai da fonte central localizada no núcleo da galáxia (Wuensche, 2003; Choudhuri, 2010).

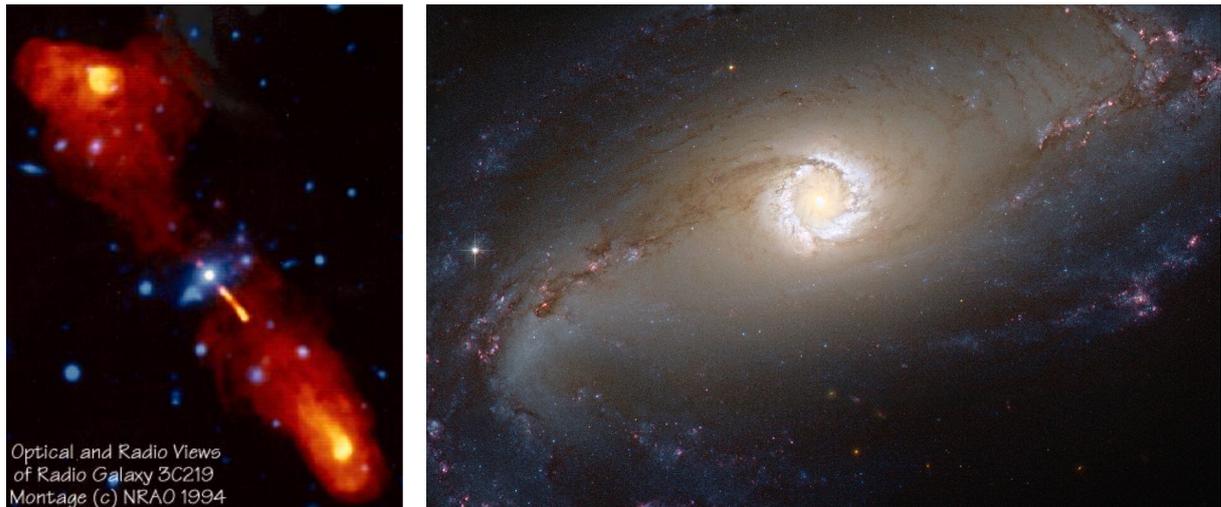


Figura 7 – Esquerda: Combinação da imagem ótica (em azul) com a rádio (em vermelho) do quasar 3C 219. Observa-se os lóbulos de matéria saindo da fonte (região central) e o forte jato em uma das extremidades do objeto. Créditos: National Radio Astronomy Observatory. Direita: A galáxia NGC 1097 é um exemplo de Seyfert. O buraco negro supermassivo no centro tem o equivalente a 100 milhões de massas solares. Créditos: ESA/Hubble & NASA; E. Sturdivant.

As galáxias Seyfert são galáxias espirais com núcleos muito brilhantes, mais comuns e menos luminosas que os quasares, e a emissão de radiação dessas galáxias tende a variar em períodos relativamente curtos, sugerindo que a fonte é compacta, como um buraco negro supermassivo. Os blazares e BL Lac, são galáxias com jatos apontados diretamente para a Terra, exibindo intensa variabilidade e núcleo brilhante. Muitos desses objetos são fontes de rádio, logo, acredita-se que são rádio-galáxias, porém orientadas de forma que a linha de visada fica na direção do jato (Neto, 2022).

1.2 Galáxias peculiares aneladas

As galáxias irregulares, ao contrário das galáxias espirais e elípticas que possuem estruturas mais definidas, não têm uma forma regular, geralmente, caóticas e assimétricas, e para algumas, locais de intensa atividade de formação estelar (Saraiva; Filho; Müller, 2023). Nesta pesquisa temos como foco um dos tipos de galáxias irregulares, as galáxias que possuem anéis. As galáxias aneladas, RGs (*ring galaxies*) ou “galáxias em anel”, têm a aparência de um anel, e conforme Appleton e Struck-Marcell (1996), são frutos de acidentes cósmicos de proporções gigantescas. Uma das primeiras galáxias aneladas apresentadas foi a *Cartwheel*³ (Figura 8), localizada na constelação do Escultor, descoberta pelo astrônomo suíço Fritz Zwicky, em 1941. As RGs, geralmente, têm seu núcleo localizado em uma posição assimétrica em relação ao anel e podem possuir estruturas como nódulos nos anéis, i. e. regiões que têm alta taxa de formação estelar, filamentos e deformações (Lago et al., 2016).

³ Identificação de outros catálogos: AM 0035-335, ESO 350-40 e HRG 35002.



Figura 8 – Esquerda: imagem no infravermelho próximo (NIRCam) e infravermelho médio (MIRI), detalhando os brilhantes anéis, interno e externo, da Grande Cartwheel. Direita: imagem no infravermelho médio (MIRI) onde se observa grande taxa de formação estelar no anel externo, enquanto que na região central há maior concentração de poeira e aglomerados de estrelas. Imagens capturadas pelo Telescópio Espacial James Webb. Créditos: NASA, ESA, CSA, STSci. O astrônomo Zwicky ao observar Cartwheel com uma câmera Schmidt de 18 polegadas na montanha Palomar em 1941, disse que esta galáxia representava "uma das estruturas mais complicadas que aguardam explicação com base na dinâmica estelar".

O astrônomo americano Halton Arp publicou em 1966 o *Atlas of peculiar galaxies* (Arp, 1966) que contém 338 imagens de galáxias do hemisfério norte, agrupadas de forma a reunir objetos com estruturas exóticas e semelhantes. A classificação das galáxias aneladas foi feita pela primeira vez por Theys e Spiegel (1976), com base no catálogo de Arp (1966), denominando-as por R (do inglês *ring*). Em 1987, *A catalogue of southern peculiar galaxies and associations* (Arp; Madore, 1987) categorizou 489 galáxias peculiares do hemisfério sul, em 25 tipos morfológicos, sendo a sexta categoria, as RGs. O estudo desses objetos nos auxilia a compreender alguns dos processos de perturbações e interações entre as galáxias, e também, a nos confrontar com outros que não compreendemos.

Os anéis, comumente azuis comparados a outras galáxias normais, possuem condensações de regiões HII (hidrogênio ionizado), onde há atividade de formação estelar intensa (Fogarty et al., 2011). Estudos mais precisos dos anéis, e casos particulares, são necessários para certificar que constituem de fato toda a galáxia e que realmente têm forma de anel no espaço, e não conchas esféricas ou um efeito de absorção de matéria peculiarmente distribuída (Cannon; Lloyd; Penston, 1970), para desta forma obter uma caracterização de propriedades das RGs e classificar qualitativamente suas morfologias de acordo com classes e sub-classes. Pesquisas com dados fotométricos (Mayya et al., 2024; Myrrha et al., 1999) mostram que os anéis possuem formação estelar intensa, e em algumas RGs, o anel é o único lugar onde estas novas estrelas estão se formando. Os anéis podem ser usados para ilustrar os efeitos da força gravitacional da galáxia alvo, bem como mecanismos que levam ao nascimento e morte de estrelas na propagação de ondas de densidade (Appleton; Struck-Marcell, 1996), ferramentas para a compreensão da estrutura e evolução galáctica.

1.2.1 Morfologia peculiar

A morfologia peculiar das RGs pode ser classificada por dois processos: quando os anéis são fruto de interações com o meio ou com outras galáxias, denomina-se como peculiares (peculiar ring galaxy - PRG) e estes objetos são bem raros, aproximadamente um a cada 10^4 (Binney; Tremaine, 1987); ou quando a origem do anel se deve à ressonância da barra de uma galáxia espiral ou perturbações do fluxo de gás do interior da galáxia, são classificados como ressonantes (normal ring galaxy - NRG), observado em galáxias SB(r), Sa(r) e SAB (Faúndez-Abans; de Oliveira-Abans, 1998; Buta, 1995). Na maioria dos casos de NRG, o anel interno possui semelhanças de idade, composição química e cor da galáxia. Anteriormente, por Few e Madore (1986), foi proposta uma classificação semelhante, tipo-O para as RGs com anéis ressonantes, e para os anéis clássicos colisionais, tipo-P. Os anéis também foram classificados por três tipos de fenômenos distintos por Buta (1995): (a) normal ou de ressonância, que se forma por ação de torques gravitacionais; (b) colisional, que se origina a partir de uma onda de choque expansiva de gás devido à colisão com uma galáxia companheira; (c) polar, onde o anel consiste em um disco inclinado em relação ao plano de uma galáxia, sendo fruto de uma fusão disruptiva. Atualmente, a melhor classificação morfológica das classes e subclasses das RGs é a de Faúndez-Abans e de Oliveira-Abans (1998), que categorizaram visualmente 489 PRGs do catálogo “Catalogue of Southern Peculiar Galaxies and Associations” de Arp e Madore (1987), dividindo os anéis em cinco famílias, ilustradas na Tabela 1 e Figura 9:

Famílias de Anéis	Código	Estruturas básicas
Polar	P	(a) Fuso; (b) Saturno; (c) Tipo Minhoca
Hoag	H	(a) Hoag; (b) Tipo Hoag
Elíptico	E	(a) Nódulos; (b) Suave; (c) Solitário
Irregular	I	
Centralmente Suave	CS	

Tabela 1 – Classificação dos anéis⁴.

Esta divisão de classes e subclasses feita por Faúndez-Abans e de Oliveira-Abans (1998), está relacionada com as características e mecanismos de formação dos anéis, de acordo com o tamanho e formato, elipticidade e presença de um bojo no interior do anel ou nele próprio. A estrutura dos anéis do tipo Polar são resultado da acreção ou fusão de matéria rica em gás de uma companheira próxima. À estas RGs da família Polar, são atribuídas três estruturas básicas: Spindle (fuso ou eixo alongado), que possui anel em forma de fuso e perpendicular (ou quase) ao eixo da galáxia; Saturn (Saturno), galáxia com núcleo (bojo) esférico ou elíptico e anel redondo; Worm-like (tipo minhoca), contém um bojo alongado semelhante a uma minhoca e anel com nódulo (região de forte formação estelar) (Faúndez-Abans; de Oliveira-Abans, 1998). Os objetos da família Hoag, o nome vem de Arthur Hoag, astrônomo americano que descobriu em 1950 uma RG nomeada posteriormente de objeto de Hoag (arquétipo PGC 54559), possuem um notável

⁴ Tabela adaptada de (Faúndez-Abans; de Oliveira-Abans, 1998).

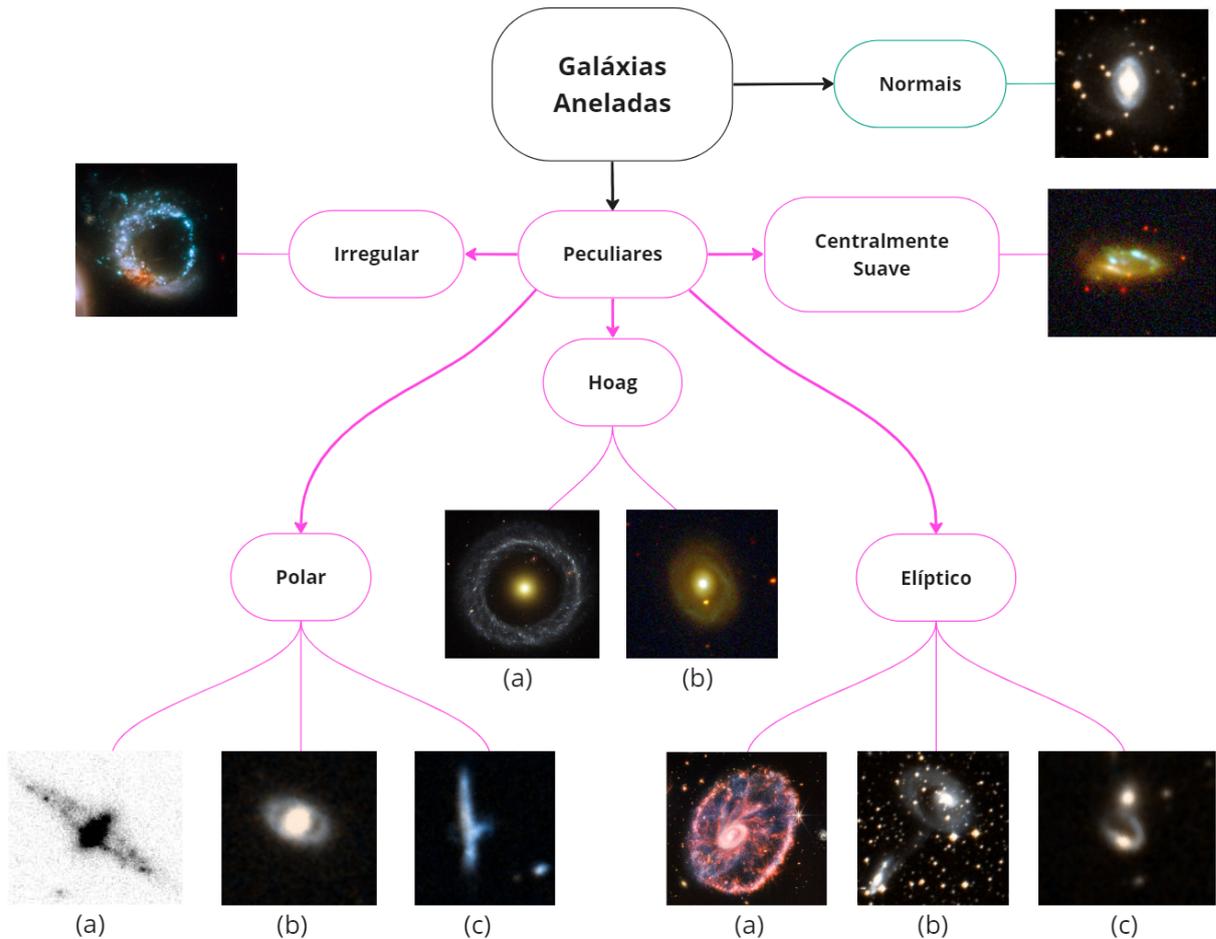


Figura 9 – Polar (a) Spindle: A0136 0801, créditos: (Sackett; Pogge, 1995); Polar (b) Saturn: HRG 54103, Polar (c) Worm-like: ESO 199-IG12, Elíptico (b) Suave: HRG 13801, Elíptico (c) Solitário: ESO 189-2, créditos: Digitized Sky Survey, STScI/NASA e CDS; Centralmente Suave: HRG 50201, Hoag (b) Hoag-like: AM 0425-421, créditos: S-PLUS; Elíptico (a) Nódulos: HRG 35002, crédito: NASA, ESA, CSA e STScI; Hoag (a): PGC 54559, crédito: NASA, R. Lucas e STScI/AURA; Irregular: ARP 147, créditos: NASA’s Hubble Space Telescope. Diagrama adaptado da classificação de Faúndez-Abans e de Oliveira-Abans (1998) e construído pela autora.

anel circular ao redor do bojo e são divididos em dois tipos: Hoag, o anel possui simetria circular e um bojo difuso; Hoag-like (semelhante ao Hoag), possui anel difuso e bojo característicos de baixa elipticidade ou bojo esférico grande comparado ao Hoag. Os anéis classificados como elípticos são mais alongados, com formato de elipse, e subdividem-se em três tipos: com nódulos, que possuem regiões de intensa formação estelar, onde o bojo está ligeiramente deslocado do centro do anel; suave, em que o gás que constitui o anel se distribui de forma homogênea em torno do bojo; e solitário, quando o núcleo (bojo) da galáxia se encontra dentro do anel (anel com um único nódulo). As RGs categorizadas com anéis irregulares possuem formato de pseudo-anéis ou anéis vazios com nódulos, sem um bojo localizado na região central ou deslocado. Já as galáxias da família dos anéis centralmente suaves apresentam forma anelada com nódulos e aparência difusa, sem uma protuberância ou bojo definidos. Alguns exemplos de galáxias das classes NRG e PRG são ilustrados na Figura 9. O estudo das galáxias aneladas peculiares, que representam,

em todos os casos, interações passadas ou em andamento (Schweizer; Whitmore; Rubin, 1983), traz informações importantes sobre os processos interativos em escala galáctica que ocorrem no Universo, permitindo a observação do berçário de estrelas nos anéis, da dinâmica e das trilhas evolutivas estelares.

1.2.2 Estudo dos processos interativos

Em 1950 quando o astrônomo Hoag estudava o objeto PGC 54559, achava que provavelmente seria uma nebulosa planetária ou um fenômeno de lente gravitacional (anel de Einstein), porque na época não tinham imagens ou observações detalhadas suficientes para calcular a distância do anel e do núcleo (bojo) para afirmar que estavam à mesma distância e que portanto, seriam tudo o mesmo objeto. Em 1987, Schweizer et al. (1987) confirmaram que tanto o anel circular brilhante quanto o núcleo de PGC 54559 estavam à mesma distância e que constituíam uma galáxia como um todo, apresentando observações fotométricas e espectroscópicas. Na década de 70, Theys e Spiegel (1976) realizaram um estudo de propriedades observacionais básicas sobre a estrutura de um conjunto de RGs, onde sugerem que, em sua maioria, o anel se forma devido a uma perturbação gravitacional na galáxia hospedeira, possibilitando o estudo da dinâmica galáctica entre os objetos interagentes. Toomre e Toomre (1972) e Lynds e Toomre (1976), realizaram simulações computacionais numéricas de perturbações gravitacionais (exemplos de simulações são representados nas Figuras 10 e 11), para entender a formação dos anéis através da colisão de uma nuvem ou galáxia com outra galáxia, em geral, através do seu centro.

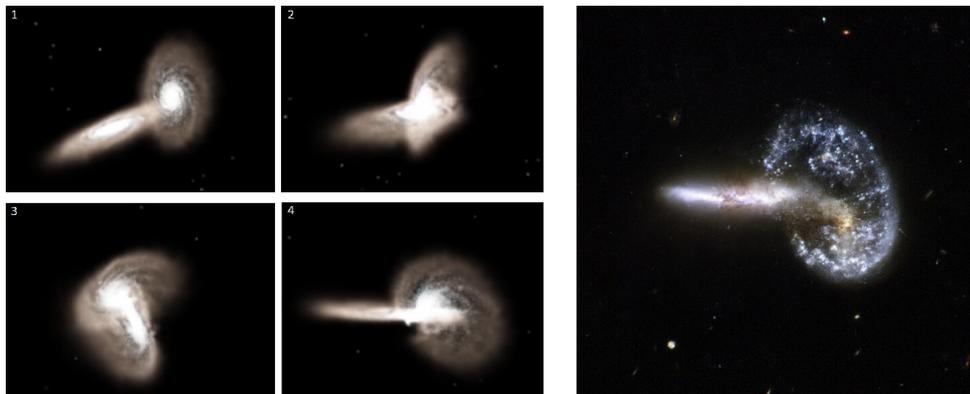


Figura 10 – Esquerda: simulação da interação entre duas galáxias espirais. Crédito: Summers, 2008. Direita: galáxia ARP 148. Créditos: NASA, ESA, the Hubble Heritage (STScI/AURA) e A. Evans (University of Virginia, Charlottesville/NRAO/Stony Brook University).

Freeman e de Vaucouleurs (1974) apresentaram um modelo para ilustrar a formação dos anéis, por meio de encontros com nuvens de HI (hidrogênio neutro) intergalácticas e as implicações para as propriedades e remanescentes dessas interações. O estudo apresenta modelos específicos de galáxias peculiares com base no conceito proposto de encontros galáxia-nuvem, em que a existência dessas nuvens moderadamente densas é postulada com base em evidências de observações de nuvens HI em vários sistemas galácticos, demonstrando que a morfologia

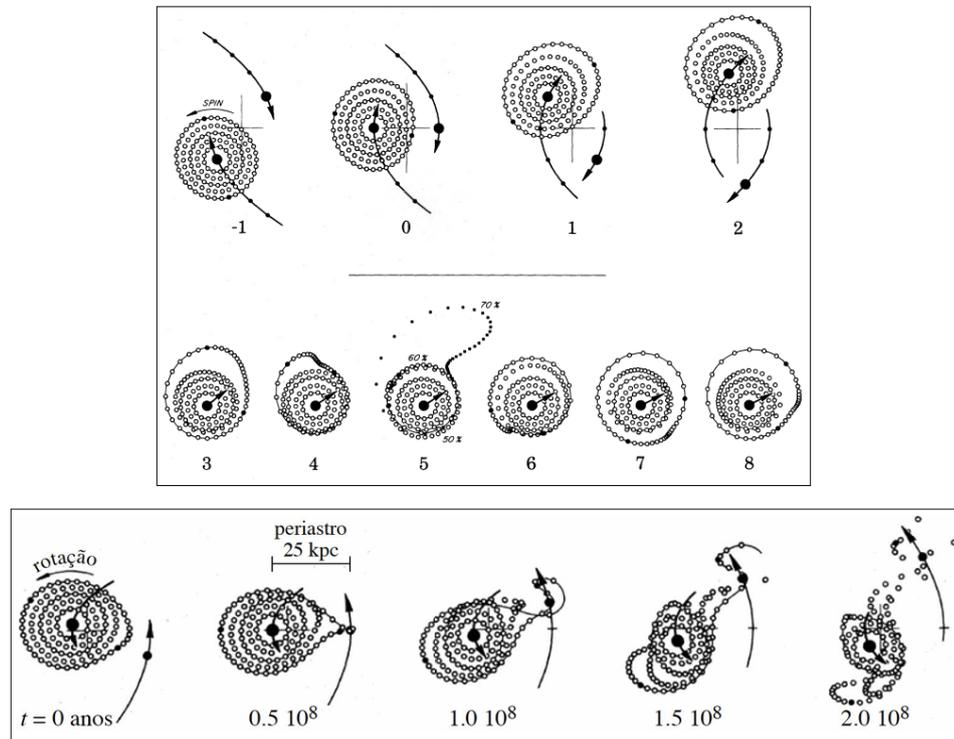


Figura 11 – Acima: Simulação da passagem de um objeto companheiro de mesma massa, onde se observam as interpenetrações parciais dos anéis mais externos e suas oscilações. Abaixo: Simulação da passagem próxima de uma galáxia anã de uma espiral. Créditos: (Toomre; Toomre, 1972)

depende da galáxia original, estágio evolutivo, ângulo de incidência e velocidade dos corpos no evento.

Atualmente, é bem reconhecido que as galáxias que passam por colisões e interações de maré intensas, resultam em fusão ou transmutação (Appleton; Struck-Marcell, 1996; Madore; Nelson; Petrillo, 2009a), mudando significativamente sua estrutura, e uma das possíveis consequências dessas interações, são os anéis desencadeados em discos galácticos (Faúndez-Abans et al., 2013). Muitos outros trabalhos de simulações, como por exemplo de Ma e Wu (2024), para analisar diferentes cenários de uma colisão para a formação de uma galáxia peculiar anelada, como também pesquisas envolvendo fotometria e espectroscopia, para estudar sistemas que estão em interação ou já passaram e classificar o objeto quanto às subestruturas morfológicas encontradas (Myrrha et al., 1999) são fundamentais para conhecer propriedades das RGs e seu processo evolutivo.

Quando se compara as classes de galáxias aneladas peculiares Polar e Hoag, por exemplo, há uma diferença de posição do anel em relação ao núcleo da galáxia. Nas galáxias polares pode-se ver claramente em suas formas a fusão de galáxias e a força gravitacional entre elas causada pela interação, apresentando uma estrutura de anel catastrófico e o gás “espalhado” entorno da galáxia. Os objetos Hoag, por outro lado, estruturados como se tivessem sido formados por um processo calmo. Em 2018, Bannikova (2018) estudou modelos de potencial e movimentos de partículas de

teste para Hoag's Object, observando as órbitas em torno da estrutura circular anelada. Analisou como a força entre o núcleo esférico e o anel equilibram as forças gravitacionais, e propõe, que está em uma região que denomina de OSCO⁵ (Figura 12). Este estudo mostra como o anel circular de Hoag's Object se mantém em equilíbrio e bem definido em torno da região central elíptica da galáxia.

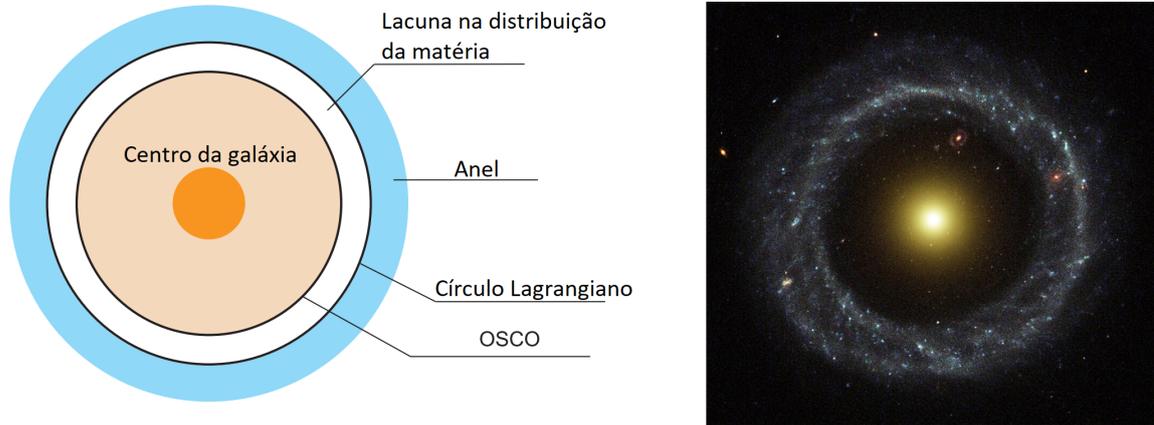


Figura 12 – Esquerda: a estabilidade das órbitas em sistemas de anéis do tipo Hoag. Adaptado de [Bannikova \(2018\)](#). Direita: galáxia PGC 54559 de anel Hoag. Créditos: NASA, The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) e Ray A. Lucas (STScI/AURA).

Recentemente, [Smirnov, Mosenkov e Reshetnikov \(2024\)](#) realizaram simulações cosmológicas TNG50 para acompanhar a formação e evolução das galáxias e traçar a origem de estruturas polares em galáxias de anel polar, e sugerem que estas estruturas são o resultado da estreita interação entre a galáxia hospedeira e sua companheira e que podem aumentar a atividade nuclear da galáxia central e/ou desligar completamente o núcleo ativo.

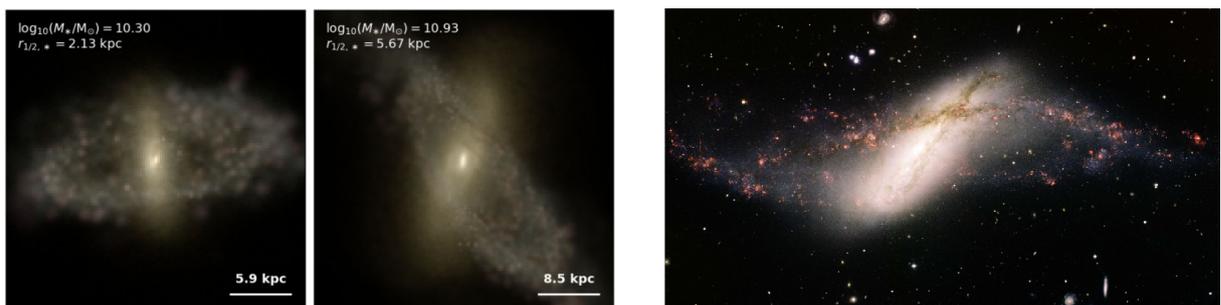


Figura 13 – Esquerda: imagens de candidatas a galáxias com anel polar do Illustris TNG50. O canto inferior direito indica a escala das imagens, e no canto superior esquerdo, massa estelar total e o raio de meia-massa estelar. Créditos: [Smirnov, Mosenkov e Reshetnikov \(2024\)](#). Direita: galáxia NGC 660 de anel polar. Créditos: Gemini Observatory/AURA.

As imagens sintéticas e a distribuição de massa bariônica (Figura 13) foram usadas para identificar galáxias com anéis polares na simulação. Os autores investigaram dois caminhos de

⁵ Denomina-se órbita circular estável mais interna (ISCO), onde o raio ISCO é $3R_g$, ($R_g = 2GM/c^2$ é o raio de Schwarzschild). Neste caso, as órbitas estáveis estão dentro da última órbita circular estável. Por analogia, órbita circular estável mais externa (OSCO - do inglês *outermost stable circular orbit*).

formação dos anéis polares estelares: formação de estrelas no gás agregado e interrupção das marés do componente estelar do satélite, observando um aumento constante na inclinação dos anéis ao longo de bilhões de anos. As características das galáxias simuladas, como luminosidades integrais, cores e tamanhos, foram em geral, de acordo com as atuais observações.

1.2.3 Observação de propriedades

Algumas observações de RGs, como a Cartwheel e o anel Lindsay-Shapley, encontraram evidências das galáxias responsáveis pela colisão dentro da faixa de distância, velocidades e ângulos de posição, esperados para interações colisionais frontais (Fosbury; Hawarden, 1977; Madore; Nelson; Petrillo, 2009a). A Figura 14 é uma composição mostrando uma imagem óptica da grande galáxia Cartwheel e galáxias menores, sobreposta com observações de rádio de alta resolução do hidrogênio neutro (representado pelos contornos verdes). Observa-se a trilha de hidrogênio neutro, do gás e poeira em ondas de rádio, mapeando sua distribuição e identificando a galáxia na extrema direita a cerca de 250 mil anos-luz, responsável pela colisão.

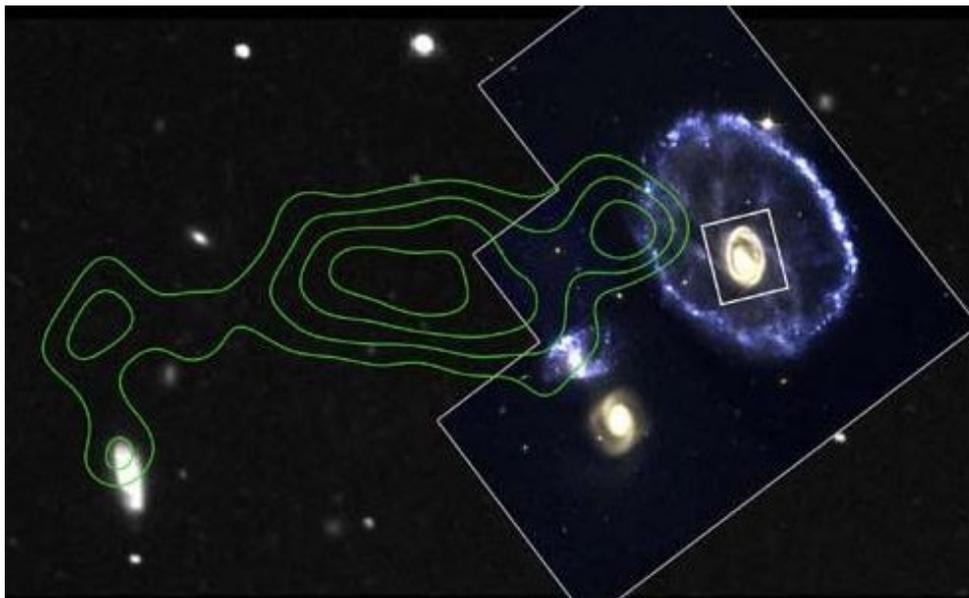


Figura 14 – A grande galáxia do grupo Cartwheel sobreviveu a uma colisão com uma pequena galáxia viajante, o que fez possível a formação de um anel expansivo ao redor do núcleo galáctico. Pela imagem do Hubble vemos as regiões azuis brilhantes no anel que são grandes aglomerados de estrelas recém-nascidas. Créditos: J. Higdon (NRAO), C. Struck, P. Appleton (ISU), K. Borne (Hughes STX), R. Lucas (STScI), NASA/ESA, Hubble Space Telescope.

Nos últimos anos, houve um grande avanço no estudo em múltiplas bandas em RGs (Figura 15), para analisar propriedades dos anéis, como a taxa de formação estelar. Em 2008, Appleton et al. (2008) apresentaram resultados de um levantamento GALEX e SPITZER de RGs colisionais, com combinação de imagens e espectroscopia UV e infravermelho médio, investigando a relação entre as regiões de formação estelares massivas e o aquecimento da poeira nos anéis.

Em Cartwheel, por exemplo, analisaram o desenvolvimento do anel e suas doze fontes luminosas ULXs (fontes de raio-X ultraluminosas), revelando um gigantesco disco UV externo. Os autores sugeriram que as fontes ULXs sejam coleções de binárias de raios-X de alta massa, associadas a aglomerados estelares massivos e luminosos, responsáveis pelo aquecimento da poeira no anel externo, e que as variações de FUV/NUV (ultravioleta distante e próximo) ocorrem com a absorção de poeira, conforme mapeado pelo Spitzer.

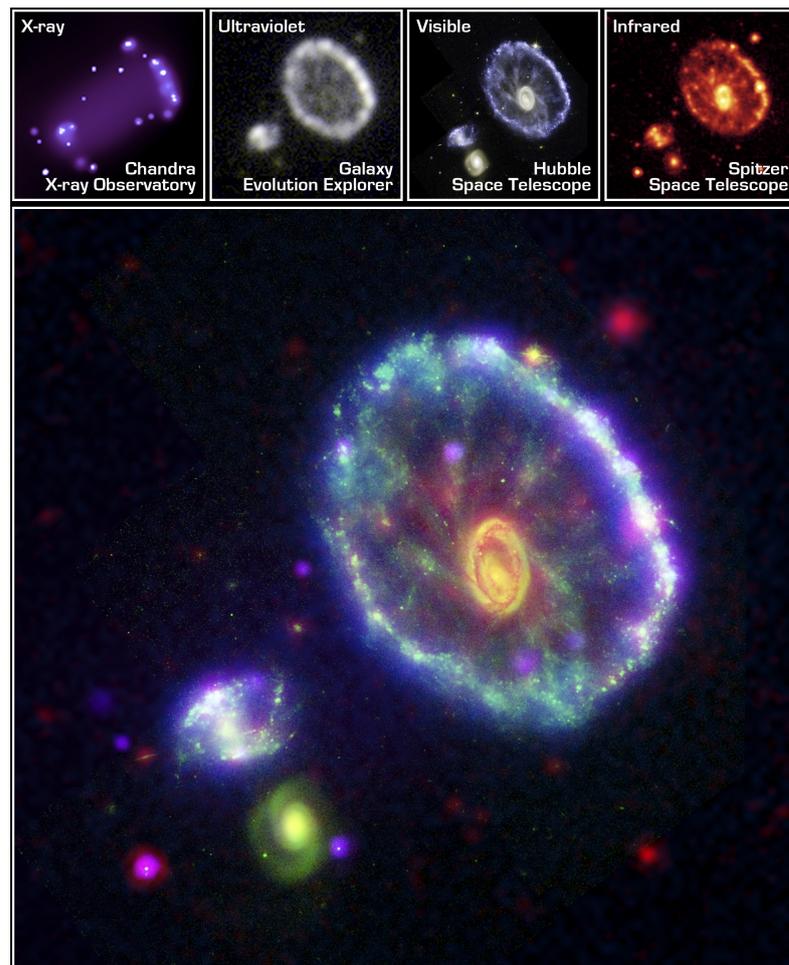


Figura 15 – Combinação de dados de quatro observatórios: Observatório de Raios-X Chandra (roxo); satélite Galaxy Evolution Explorer (ultravioleta/azul); Telescópio Espacial Hubble (visível/verde); Telescópio Espacial Spitzer (infravermelho/vermelho). Créditos: NASA/JPL/Caltech/P.Appleton et al.; raio-X: NASA/CXC/A.Wolter & G.Trinchieri et al.

Em 2012, [Prestwich et al. \(2012\)](#) descobriram uma correlação entre o número dessas fontes luminosas e a taxa de formação estelar, através de simulações de população binária de raios-X de alta massa para NGC 922 e Cartwheel (ambas RGs com anel em expansão), para entender a origem de ULXs. A população ULXs nos dois objetos foi analisada, levando em consideração fatores como metalicidade (visto que ambas as galáxias possuem proporções diferentes) e taxa de formação de estrelas. As simulações previram a razão do número dessas fontes em ambas as galáxias com a taxa de formação estelar, concluindo que a metalicidade

da Cartwheel não é baixa o suficiente para mostrar uma diferença na população de ULXs em comparação com NGC 922. Neste estudo, os autores propuseram também que as ULXs possam ser dominadas por sistemas com forte acreção de massa de buracos negros gigantes de colapso-direto, contribuição importante para o seu papel na evolução das galáxias. Quando estrelas massivas explodem como supernovas, deixam para trás estrelas de nêutrons e buracos negros, que podem possuir estrelas próximas e se tornarem poderosas fontes de raios-X muito brilhantes ao retirar matéria de suas companheiras. Por possuírem essas fontes ULXs espalhadas pelo anel, estas galáxias se tornam interessantes laboratórios para sondar os objetos mais pesados do universo, os buracos negros, e conforme [Pizzolato, Wolter e Trinchieri \(2010\)](#) sugeriram, a mais brilhante fonte desses raios-X, seria provavelmente, um buraco negro de massa intermediária.

Evidências de estrelas jovens e velhas em Cartwheel também foram encontradas, em 2024, por [Mayya et al. \(2024\)](#), que analisaram imagens FUV (ultravioleta distante) profundas e de alta resolução obtidas com a missão AstroSat/UVIT e imagens ópticas e infravermelhas publicamente disponíveis (Figura 16), para estudar as diferentes idades e propriedades das estrelas na galáxia. Identificaram 73 regiões no FUV, as quais 58 estão localizadas no anel externo e 15 pertencem aos “raios” que o ligam ao núcleo, e que há tanto estrelas antigas quanto jovens no anel, sendo a maior concentração das mais velhas, no núcleo. Concluíram que, provavelmente, as regiões em UV nos raios acompanham a formação estelar desencadeada pela passagem da onda em expansão, onde algumas das estrelas formadas na onda no passado, foram arrastadas ao longo dela até a posição atual do anel, segundo o cenário colisional para galáxias aneladas.

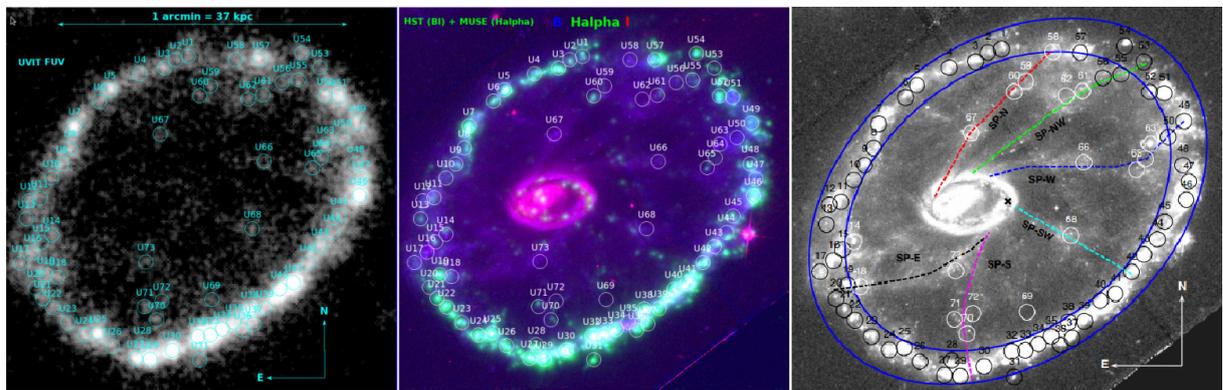


Figura 16 – Esquerda: Fontes compactas FUV identificadas na imagem FUV do UVIT (círculos ciano). Meio: Imagem composta de cores RGB usando os filtros HST/WFPC2 F450W (azul), VLT/MUSE $H\alpha$ (verde) e HST/WFPC2 F814W (rosa), identificando com as cores a predominância das populações estelares I e II, no anel externo e interno, respectivamente. Direita: Identificação dos raios proeminentes na imagem F435W. Linhas tracejadas de cores diferentes são desenhadas para identificar cada raio e duas elipses concêntricas delimitam as fontes UV pertencentes ao anel formador de estrelas (círculos pretos). Todas as fontes UV situadas entre os anéis interno e externo pertencem a um dos seis raios da Cartwheel. Créditos: [Mayya et al. \(2024\)](#).

Em 2001, [Reshetnikov, Faúndez-Abans e de Oliveira-Abans \(2001\)](#) realizaram um levantamento de 27 galáxias de núcleos ativos, peculiares de anel polar e candidatas, e estimaram

que uma porcentagem significativa da amostra eram galáxias Seyfert, cerca de 12,5-25%, e LINERs (Low-Ionization Nuclear Emission-line Region, são galáxias que também apresentam atividade nuclear, mas em comparação com as Seyfert, têm uma ionização mais baixa em suas linhas espectrais), 33-41%. A observação de galáxias por meio de técnicas como fotometria, que permite visualizar em imagens as diferentes estruturas, estrelas e outros componentes, e espectroscopia, que examina a interação entre a radiação e a matéria fornecendo informações sobre composição, temperatura, densidade e movimento de objetos, são fundamentais para a compreensão do funcionamento desses sistemas.

1.3 Fotometria

A fotometria é uma técnica utilizada para medir a luz proveniente de um objeto, e quase toda informação que temos sobre o universo, vem na forma de luz. A luz (ou partículas que compõem a luz, os fótons⁶) é uma onda eletromagnética, de campo elétrico e magnético oscilante, isto é, energia. As ondas eletromagnéticas são classificadas de acordo com seus comprimentos de onda e suas frequências, propriedades relacionadas às suas energias, quanto menor o comprimento de onda, maior a frequência e energia. O espectro eletromagnético (Figura 17) é o intervalo completo de todas as frequências de radiação eletromagnética, abrangendo desde as ondas de rádio de baixa frequência até os raios gama de alta frequência.

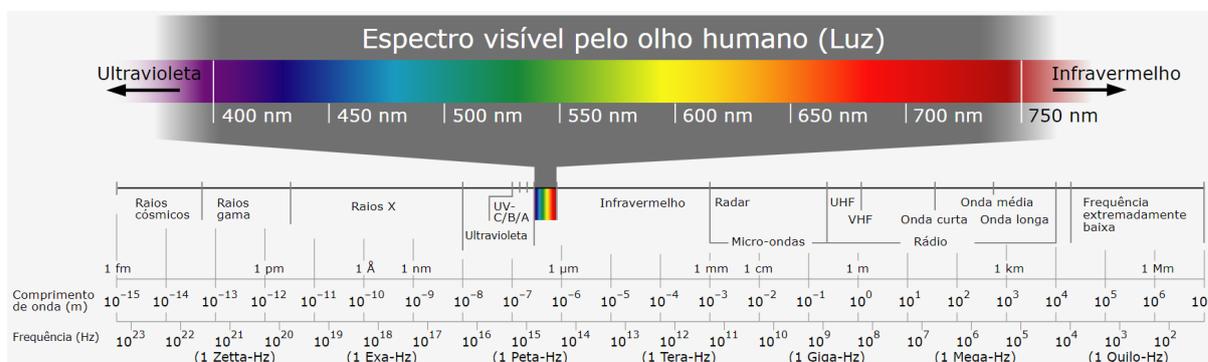


Figura 17 – Espectro eletromagnético com os tipos de radiação eletromagnética que existem em nosso universo. Créditos: Horst Frank, Jailbird e Alebergen.

A luz visível é a faixa do espectro perceptível ao olho humano, e dentro desse intervalo, diferentes comprimentos de onda correspondem às cores conhecidas. Na astronomia, a fotometria teve início no final do século XIX e, nos últimos anos, diferentes tipos de detectores nos telescópios são utilizados para estudar a radiação eletromagnética do universo, invisível aos nossos olhos. Há observações astronômicas que são feitas fora da atmosfera terrestre e na superfície da Terra (Filho; Saraiva, 2023). O espectro eletromagnético, desde os raios gama até as ondas de rádio, é usado para observações astronômicas para estudar informações sobre a natureza e propriedades

⁶ Fóton é a unidade quântica elementar de luz. Na física quântica, os fótons são descritos como partículas discretas de energia que compõem a radiação eletromagnética e têm características tanto de onda quanto de partícula.

físico-químicas de uma fonte, como por exemplo, medir o fluxo e a cor de uma estrela e estimar sua temperatura. Para isso, é necessário usar filtros, como ilustra a Figura 18, de forma que a luz de vários comprimentos de onda cheguem ao telescópio, mas somente a luz permitida pelos filtros são recebidas pelo detector.

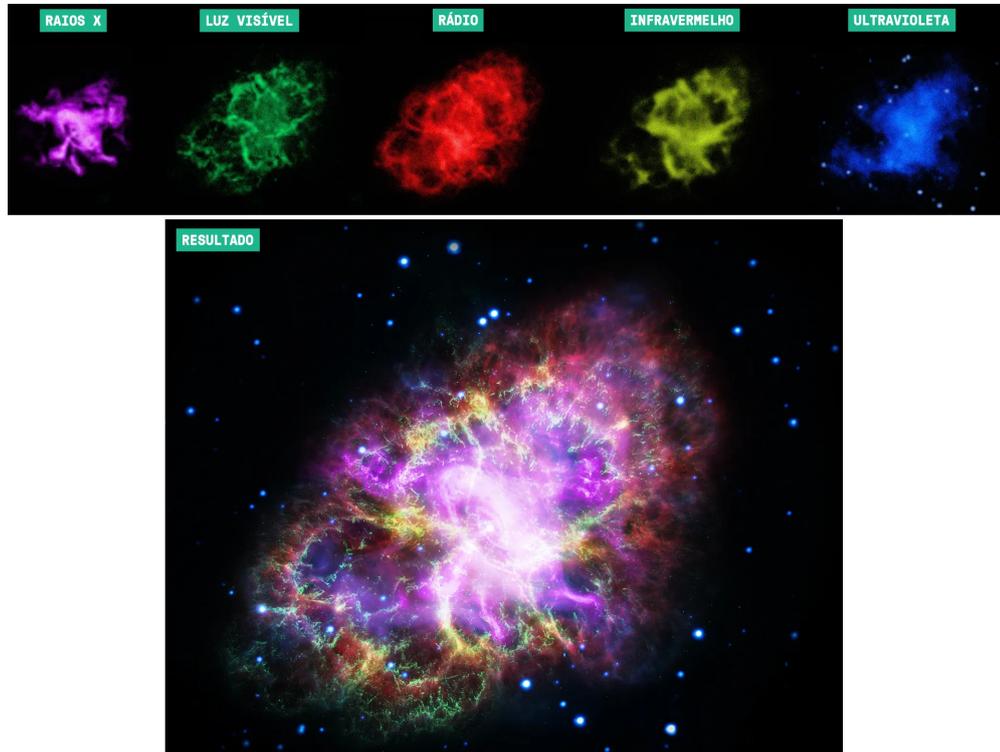


Figura 18 – A Nebulosa de Caranguejo é o resultado de uma explosão de supernova, e em seu centro, há uma estrela de nêutrons super densa, emitindo luz nas ondas de rádio e visível. Na região central, há uma mistura de materiais, incluindo os que foram expelidos pela estrela antes de se tornar uma supernova e os que foram lançados durante a explosão. Ventos carregados de partículas são expelidos da estrela de nêutrons, energizando a poeira e o gás ao seu redor. Essas diversas camadas e os filamentos que compõem a nebulosa podem ser observados nesta imagem em várias faixas de comprimento de onda. Combinação de filtros: raios-X, telescópio Chandra; luz visível, telescópio Hubble; ondas de rádio, observatório Very Large Array; infravermelho, telescópio Spitzer; ultravioleta, satélite X-ray Multi-Mirror-Newton. Créditos: NASA, ESA, G. Dubner et. al., NRAO e Caltech.

A astronomia e astrofísica são ciências que dependem muito das observações, voltadas para imagens e processamento de imagens, portanto, os diferentes filtros representados por cores são importantes ferramentas, em uma imagem combinada de filtros e cores, e revelam, a composição química das nuvens de gás, poeira, estrelas e outros componentes de um objeto observado (Soares, 2007). Galáxias e nebulosas emitem mais luz em comprimentos de onda muito específicos devido aos componentes e elementos que as constituem, como o hidrogênio e oxigênio por exemplo. A quantidade de luz que recebemos de cada elemento traz informações importantes sobre a riqueza química e a física que está ocorrendo em um objeto astronômico, sendo essencial para a imagem o quanto (intensidade) dessa luz em específico existe. Para isso, é preciso cores

para as bandas largas e bandas estreitas (exemplo Figura 19) para os respectivos filtros. As bandas largas cobrem uma ampla região de comprimentos de onda. Por exemplo, uma banda larga pode cobrir uma grande faixa do espectro visível ou incluir uma parte significativa do infravermelho ou ultravioleta. As bandas estreitas são faixas de comprimento de onda relativamente pequenas, e são selecionadas para observar características espectrais específicas, como linhas de emissão ou absorção de elementos químicos, regiões de alta ionização, ou outros fenômenos que são proeminentes em comprimentos de onda específicos (Filho; Saraiva, 2023).

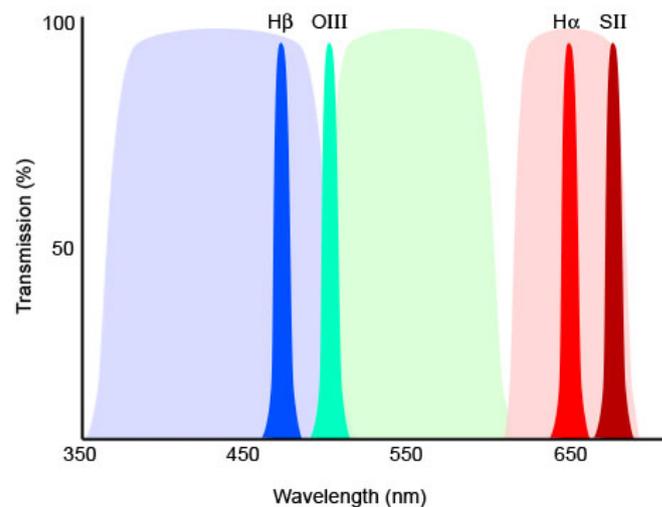


Figura 19 – Exemplo de bandas estreitas (H β , OIII, H α e SII) combinadas com bandas largas (em azul, verde e vermelho claros). Créditos: telescopio.com.br.

Para extrair detalhes sobre os objetos observados, como as diferentes estrelas, história de formação estelar e morfológica, é necessário conhecer as emissões em cada faixa do espectro. Na faixa dos raios gama, por exemplo, podemos estudar buracos negros e regiões formadoras de estrelas, e os raios-X, observar estrelas compactas, estrelas de nêutrons e também buracos negros. A faixa do ultravioleta revela informações sobre estrelas quentes, galáxias AGNs e regiões onde estrelas estão se formando. A luz visível abrange observações de planetas, estrelas, cometas, asteroides e galáxias. No infravermelho, o estudo de estrelas frias, meio interestelar, galáxias e poeira. As micro-ondas são usadas no estudo de elementos químicos nos astros e na radiação cósmica de fundo, e as ondas de rádio, são aplicadas no estudo de quasares, rádio-galáxias e outros fenômenos (Filho; Saraiva, 2023; Neto, 2022).

Em 2024, por exemplo, Sundar Samantaray et al. (2024) realizaram fotometria no ultravioleta próximo (NUV) e ultravioleta distante (FUV) de um sistema de galáxias em interação (conhecido por Arp 298, Figura 20), composto por uma galáxia do tipo Seyfert 1, a NGC 7469, e sua companheira IC 5283, para resolver e mapear as regiões de formação estelar nos braços externos (população estelar I) e buscar sinais de interação entre as duas galáxias. Os autores derivaram a distribuição espectral de energia (SED, do inglês, *Spectral Energy Distribution*), determinando parâmetros físicos, como a taxa de formação estelar global, massa estelar e de

poeira. Esse estudo fotométrico mostrou que a maior parte da atividade de formação estelar está confinada dentro do anel central da galáxia alvo. Outro exemplo, é o trabalho de [Akhil, Kartha e Mathew \(2024\)](#), que através da análise fotométrica, exploraram o sistema de aglomerados globulares (população estelar II) e suas propriedades na galáxia peculiar anelada polar NGC 4262 (Figura 21). Realizaram as distribuições espaciais e azimutais das populações estelares e encontraram evidências de interações anteriores dentro da galáxia hospedeira. Além disso, investigaram as relações de escala globais entre os aglomerados globulares e parâmetros da galáxia hospedeira, dando suporte para a hipótese de que as RGs de anel polar são uma fase intermediária conectando fusões em curso e galáxias quiescentes (galáxias em que a formação de estrelas não ocorre mais de maneira significativa).

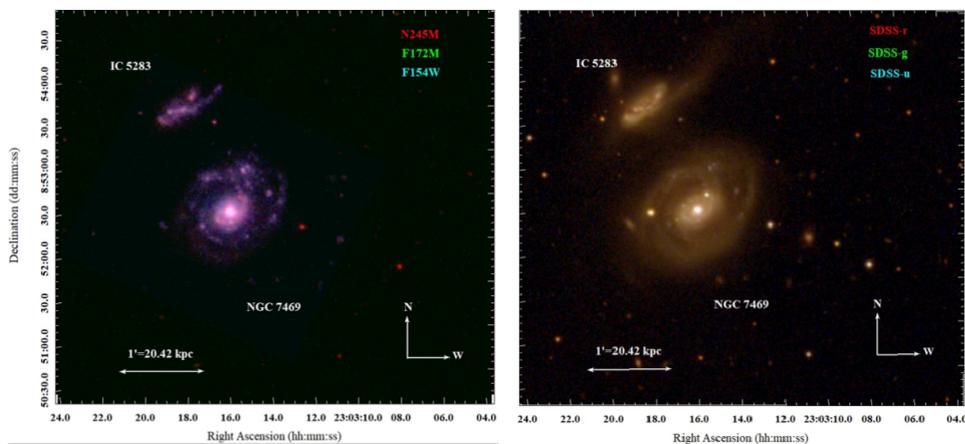


Figura 20 – Esquerda: Imagem RGB composta de NGC 7469 e IC 5283 usando os filtros N245M (vermelho), F172M (verde) e F154W (azul). Esta imagem mostra claramente a presença de braços espirais internos e nós que atuam como evidência da formação estelar. Direita: Imagem RGB composta usando os filtros SDSS-r (vermelho), SDSS-g (verde) e SDSS-u (azul). Créditos: ([Sundar Samantaray et al., 2024](#)).

O avanço científico dos levantamentos (*surveys*) fotométricos e espectroscópicos, antes associados aos atlas e hoje aos amplos catálogos de fontes e suas propriedades, permitem analisar e combinar informações de muitos bancos de dados, em diversos filtros para seus respectivos comprimentos de onda, e obter novas características dos objetos. Eles mapeiam a distribuição tridimensional das galáxias, aglomerados de galáxias e outras estruturas em largas escalas, de forma a ilustrar como o universo é organizado e como essas estruturas evoluíram ao longo do tempo.

Ao examinar o espectro de luz, os *surveys* espectroscópicos revelam informações sobre a história, evolução e expansão do universo, investigando a natureza da matéria escura e da energia escura, dois dos maiores desafios da física e da cosmologia modernas. Os levantamentos fotométricos fornecem informações sobre a distribuição espacial, tamanho, forma, cor, luminosidade e outras características físicas dos objetos observados. Isso é fundamental para estudar como as galáxias se formaram, evoluíram e se enriqueceram ao longo do tempo e como interagem umas com as outras em diferentes ambientes. A fotometria de alta precisão é essencial, por exemplo,

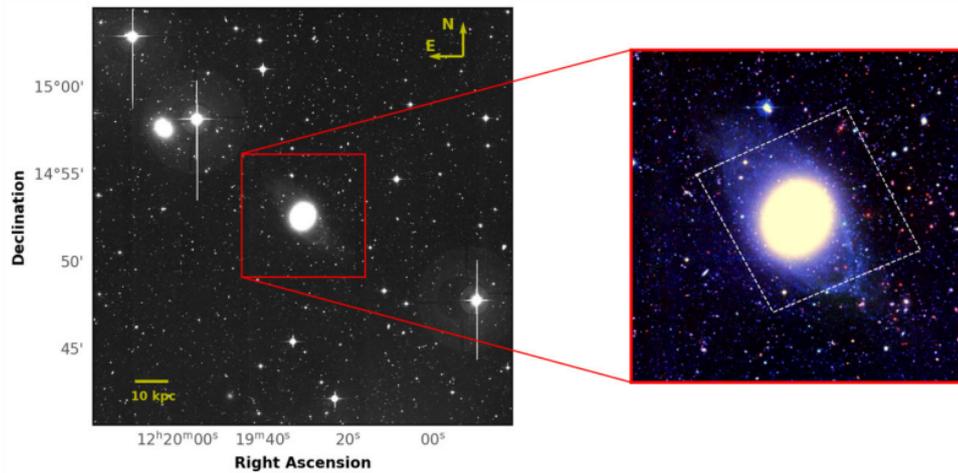


Figura 21 – Esquerda: Imagem óptica em banda g de NGC4262 usando o Canada France Hawaii Telescope (CFHT). Direita: Imagem colorida óptica com as cores azul, verde e vermelho, representando as bandas CFHT u, g e i, respectivamente. Esta imagem da galáxia revela um componente de anel óptico fraco que permaneceu não detectado nas imagens ópticas anteriores. A linha pontilhada branca representa a região observada pelo Hubble Space Telescope (HST). Créditos: (Akhil; Kartha; Mathew, 2024).

na detecção e caracterização de exoplanetas (planetas fora do nosso sistema solar).

Dessa forma, é importante otimizar a detecção da radiação para a qualidade da obtenção dos dados, e atualmente, técnicas e instrumentos foram aprimorados para esta necessidade. Além disso, a qualidade da fotometria também está associada à redução de erros nos dados, que podem distorcer as análises e levar a interpretações incorretas dos espectros de energia dos objetos.

O processo de fotometria envolve várias etapas para corrigir e processar as imagens capturadas pelo detector do telescópio, para que as medições finais sejam de qualidade para a análise científica. A redução de dados fotométricos consiste principalmente no tratamento de dados do detector CCD (Charge Coupled Device, ou *CCD*, são circuitos que consistem de uma matriz), correção dos efeitos da atmosfera da Terra, transformação ao sistema fotométrico padrão e correção por avermelhamento interestelar. Os tratamentos de dados do CCD incluem o overscan, bias, flatfield e dark, processos responsáveis em remover efeitos aditivos e multiplicativos. Às imagens, obtidas através de diferentes filtros (ou faixas de banda), e para cada um, é medido o fluxo (Filho; Saraiva, 2023).

A qualidade dos dados fotométricos influencia diretamente a confiabilidade e a precisão das estimativas de parâmetros físicos, por exemplo, para a utilização de modelos que interpretam as distribuições espectrais de energia (SED) das galáxias. Dados precisos são a base para inferências sobre a formação estelar, massa estelar, atenuação da poeira e outras propriedades. Um exemplo de modelo que interpreta as SEDs de objetos é o MAGPHYS (da Cunha; Charlot, 2011), que analisa e interpreta as propriedades físicas de galáxias com base em observações espectrais em várias faixas de comprimento de onda, desde o ultravioleta distante até o infravermelho, sendo capaz de estimar parâmetros relacionados às estrelas e ao meio interestelar das galáxias,

como as histórias de formação estelar, metalicidade e conteúdo de poeira. Estas ferramentas que interpretam a SED de um objeto, comparam as distribuições de energia espectral observadas com um conjunto de modelos teóricos, com a finalidade, por exemplo, de compreender os processos evolutivos das galáxias e a investigação das propriedades do meio interestelar. Outro exemplo é o GalaPy (Ronconi et al., 2024) (Figura 22), que faz modelagem e ajuste de SEDs de galáxias, desde a faixa de raios-X até rádio, bem como a evolução de seus componentes e a atenuação/reemissão por poeira, para estudar as principais características físicas das galáxias, como suas histórias de formação estelar, conteúdo de matéria e parâmetros físicos.

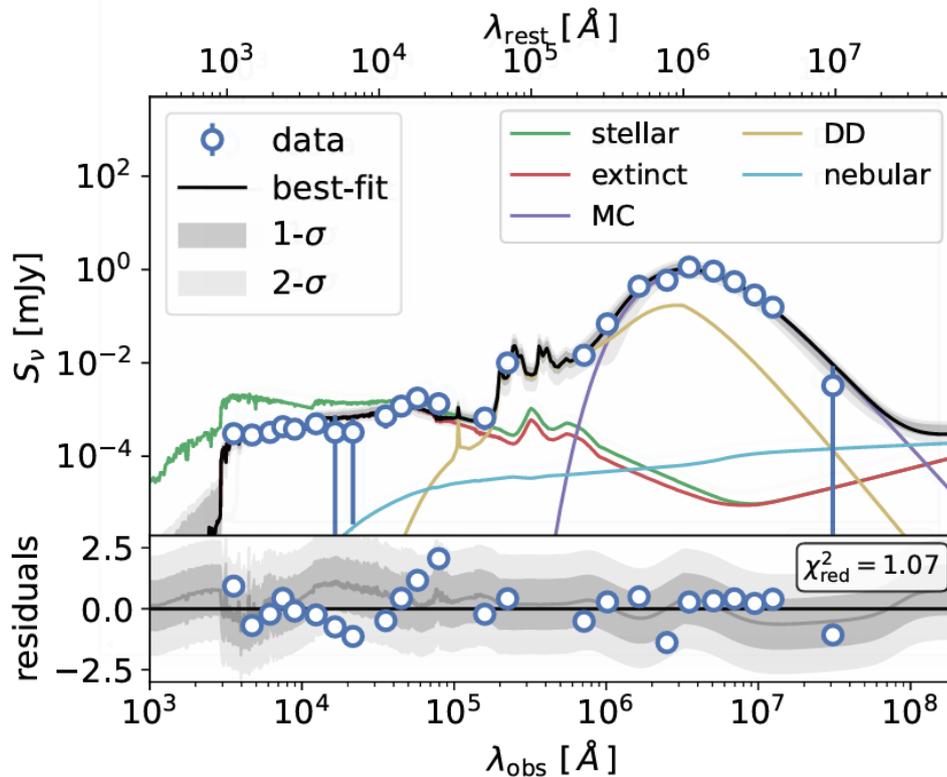


Figura 22 – Comparação da SED observada de uma galáxia com a biblioteca do GalaPy para o estudo de propriedades estelares e evolução da galáxia. Painel superior: melhor ajuste da SED (linha preta sólida) e componentes (linhas coloridas) comparados aos dados da observação simulada (marcadores azuis vazios); também são mostradas as regiões de confiança de $1-\sigma$ e $2-\sigma$ em torno da média das amostras com áreas sombreadas em cinza. Painel inferior: resíduos em relação à amostra de melhor ajuste (preto); a média e as regiões de confiança de $1/2-\sigma$ também são mostradas com uma linha sólida cinza e áreas sombreadas, respectivamente. Crédito: (Ronconi et al., 2024).

1.4 Motivação e objetivos

Objetivo Geral:

- Fornecer pontos importantes sobre a qualidade da fotometria de galáxias irregulares, com foco na família das galáxias peculiares aneladas.

Objetivos Específicos:

- Analisar 117 objetos do hemisfério sul do universo local a partir da base de dados de catálogos e atlas disponíveis, e imagens do Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS), para avaliar a qualidade da fotometria de galáxias irregulares.
- Discutir sobre a ciência das aberturas fotométricas elípticas do S-PLUS explorando as propriedades dessas aberturas e como elas são aplicadas na análise de dados, além de detalhar a obtenção das amostras e as metodologias de classificação utilizadas (Capítulo 2).
- Apresentar resultados iniciais sobre a qualidade fotométrica, avaliando a diferença de medição das magnitudes e os respectivos erros das aberturas fotométricas aplicadas às galáxias de morfologia irregular (Capítulo 3).
- Apresentar conclusões e contribuições do estudo, discutindo as conclusões e contribuições do estudo, e identificando novas perspectivas para pesquisas futuras (Capítulo 4).

2

Metodologia

2.1 Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS)

Nesta pesquisa, trabalhamos com os dados fotométricos do Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS)¹ para estudar galáxias peculiares aneladas do hemisfério sul do universo local. O S-PLUS é um levantamento por imagem que cobrirá (Figura 23) aproximadamente 8000 graus² do céu do hemisfério sul em altas latitudes galácticas e cerca de 1300 graus² sobre o disco e o bojo de nossa galáxia ao final do lançamento de seus dados. Utiliza um telescópio robótico (T80S) de abertura de 0,8 metros no Observatório Interamericano Cerro Tololo (CTIO), no Chile.

O *survey* possui colaboração internacional fundada pela Universidade de São Paulo, Observatório Nacional, Universidade Federal de Sergipe, Universidad de La Serena e Universidade Federal de Santa Catarina.

2.1.1 Instrumentação e ciência

O S-PLUS possui um sistema de 12 filtros (Figura 24 e Tabela 2), combinados em 5 bandas largas similares ao SDSS (Sloan Digital Sky Survey), u , g , r , i e z , sendo que o filtro de banda u é o filtro de *Javalambre* e possui uma curva de transmissão mais eficiente comparada com a banda u do SDSS, conforme descreve [Cenarro et al. \(2019\)](#), e 7 bandas estreitas centradas em linhas de absorção e emissão específicas, importantes para caracterização da distribuição espectral de energias em classificação de estrelas, [OII], Ca H+K, banda G, H δ , tripleto de Mgb, H α e tripleto de Ca ([Mendes de Oliveira et al., 2019](#)). O telescópio possui a câmera T80Cam-S e o detector (CCD) de matriz de 9232 \times 9216 pixels, com uma escala de 0,55 segundos de arco por pixel e um campo de visão (*field of view*, FoV) de 1,4 \times 1,4 graus².

Uma das importantes vantagens do S-PLUS é o seu nível de resolução somado ao sistema de bandas estreitas para extrair informações para uma grande quantidade de objetos. Ele fornecerá uma precisão de *redshift* fotométrico $z = 0,02$ (ou melhor) para galáxias com $r < 19,7$ mag AB ou

¹ Mais informações em: <https://www.splus.iag.usp.br>.

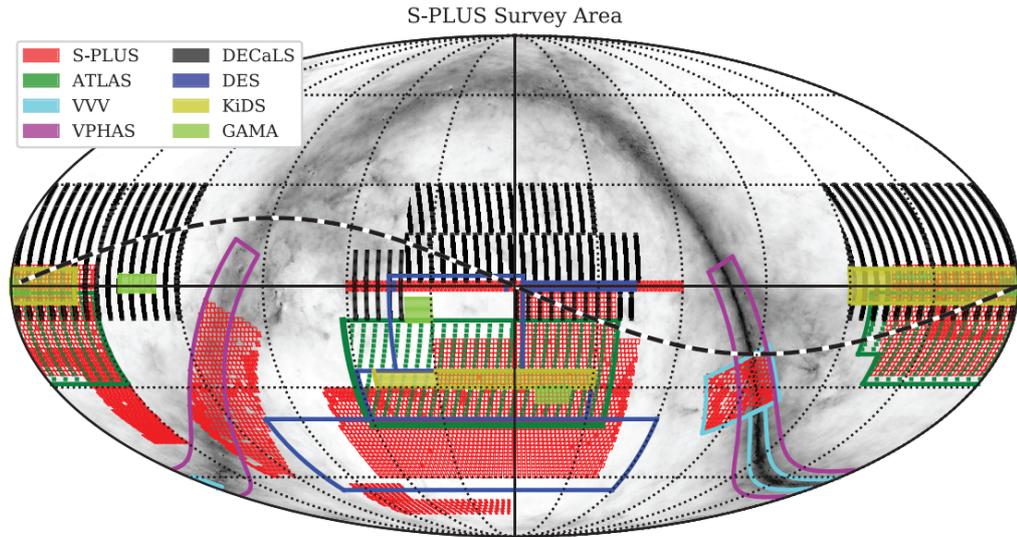


Figura 23 – Em vermelho, a área de cobertura do S-PLUS, comparada a alguns levantamentos ópticos e de infravermelho próximo no hemisfério sul. Créditos: Mendes de Oliveira et al. (2019).

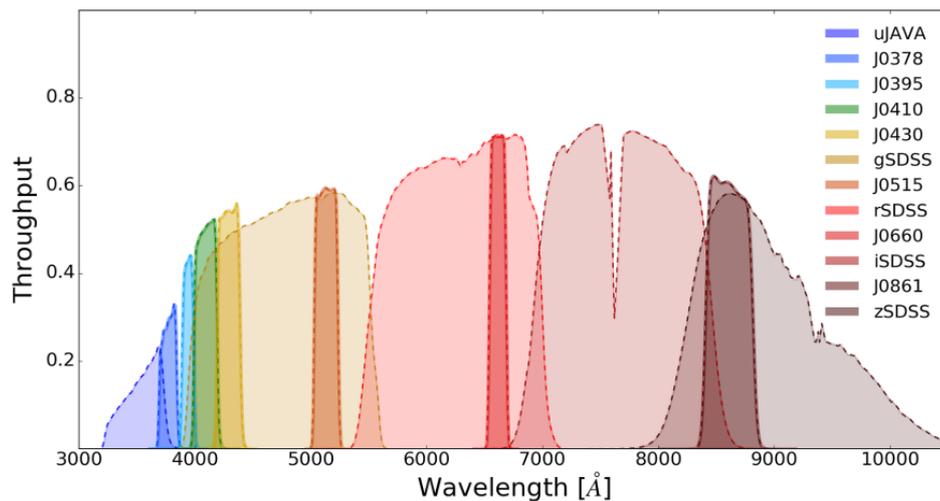


Figura 24 – A imagem mostra a eficiência total dos filtros em função do comprimento de onda. Diferentes cores são representadas para cada filtro de acordo com a legenda à direita. Os filtros J0378, J0395, J0410, J0430, J0515, J0660 e J0861 são, respectivamente, [OII], Ca H+K, H δ , banda G, tripleto de Mgb, H α e tripleto de Ca. Créditos: Mendes de Oliveira et al. (2019).

$z < 0,4$, e para galáxias com $r < 21$ mag AB ou $z < 0,5$, precisão de $z = 0,03$, grande mapeamento 3D do universo local (Mendes de Oliveira et al. (2019); Almeida-Fernandes et al. (2022)).

O *redshift* fotométrico é uma técnica utilizada na astronomia para estimar o desvio para o vermelho (z) de objetos astronômicos com base em suas características espectrais capturadas em imagens fotométricas, uma maneira rápida e eficiente (em termos de tempo de observação) de estimar *redshift*² para um grande número de objetos, e com isso, estudar a velocidade, direção

² O redshift descreve o deslocamento das linhas espectrais de um objeto em direção ao espectro do vermelho. Esse

Filter name	λ_{eff} (Å)	$\Delta\lambda$ (Å)	Comment
uJAVA	3563	352	Javalambre u
J0378	3770	151	[O II]
J0395	3940	103	Ca H + K
J0410	4094	201	H δ
J0430	4292	201	G band
gSDSS	4751	1545	SDSS-like g
J0515	5133	207	Mgb Triplet
rSDSS	6258	1465	SDSS-like r
J0660	6614	147	H α
iSDSS	7690	1506	SDSS-like i
J0861	8611	408	Ca Triplet
zSDSS	8831	1182	SDSS-like z

Tabela 2 – A tabela mostra as especificações dos comprimentos de onda centrais de cada filtro e a largura total à meia altura (medida de largura de um pico de distribuição que indica o intervalo entre os pontos em que a função tem metade do seu valor máximo) das curvas de transmissão. Créditos: [Mendes de Oliveira et al. \(2019\)](#).

do movimento e distribuição espacial de galáxias, evolução do universo, determinar distâncias e outras ciências.

Os dados³ do catálogo fotométrico multi-banda incluem as magnitudes medidas em seis aberturas diferentes para cada filtro, geradas executando o software SExtractor⁴ ([Bertin e Arnouts \(1996\)](#); [Bertin e Arnouts \(2010\)](#)): aberturas elípticas variáveis (auto e petro), abertura isofotal (iso), aberturas aper 3 e aper 6 circulares fixas e a abertura circular PStotal.

O SExtractor, inicialmente, realiza a análise de uma imagem de forma automatizada e calcula uma estimativa do nível de fundo em qualquer posição da imagem (mapa de fundo). O modelo do fundo do céu é construído e computadas as estatísticas. Os píxeis da imagem são subtraídos desse fundo, filtrados e as detecções são limpas e medidas.

As imagens finais e astrometricamente corrigidas, são geradas como uma combinação de exposições individuais de cada filtro usando, respectivamente, o SExtractor ([Bertin; Arnouts, 2010](#)) e o PSFEx ([Bertin, 2013](#)), SCAMP ([Bertin, 2010a](#)) e SWARP ([Bertin, 2010b](#)). Por fim, as medidas são escritas no catálogo de saída.

As medições são feitas nos contornos isofotais dos objetos, definidos na imagem de detecção filtrada. Somente píxeis com valores acima do limiar de detecção (fundo) são considerados e constituem o contorno isofotal ([Figura 25](#)), e o software opera neles os parâmetros

desvio para o vermelho é uma medida do quão longe e quão rápido um objeto se afasta de nós no espaço, bem como à expansão do Universo.

³ Documentação do banco de dados disponível em: <https://splus.cloud>.

⁴ Documentação: <https://sextractor.readthedocs.io/en/latest/index.html>.

(denominados de *primeiro momento*) para definir as aberturas elípticas: as coordenadas do baricentro (x e y), indica a posição do “centro” de uma fonte; formatos básicos elípticos (eixo maior a , eixo menor b e ângulo de inclinação θ) para representar a dispersão espacial máxima e mínima do perfil do objeto ao longo de qualquer direção; e alongação e elipticidade (parâmetros de elipse derivados de a e b).

As magnitudes para cada abertura são expressas no sistema AB (Absolute AB) e todos os valores dos parâmetros para cada fonte detectada são fornecidos pelo S-PLUS. Nesta pesquisa, analisamos as aberturas elípticas variáveis auto, petro e a abertura isofotal para o estudo das galáxias peculiares aneladas.

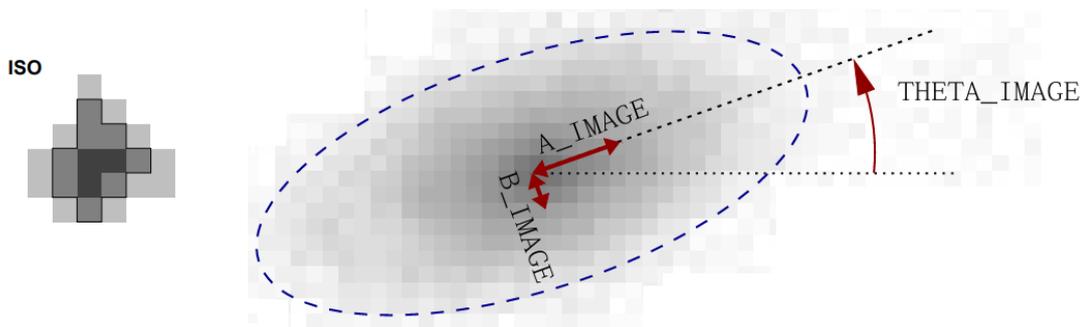


Figura 25 – Exemplo de uma detecção de píxeis com valores acima do fundo (denominado contorno isofotal e representado por iso na imagem) e os parâmetros de formatos básicos de uma elipse computados em seguida (eixos maior e menor, respectivamente A_IMAGE e B_IMAGE , e o ângulo de inclinação θ , $THETA_IMAGE$).

2.1.2 Abertura ISO

A partir das medições do *primeiro momento* (x , y , A , B , θ , alongação e elipticidade) feitas nos contornos isofotais das detecções, um parâmetro escalar (equação 2.1), é computado para dimensionar a elipse, denominado de R , baseado em C_{XX} , C_{YY} e C_{XY} (baricentros que também representam a mesma elipse). Desta forma, a área isofotal total é obtida para cada fonte.

$$C_{XX}(x - \bar{x})^2 + C_{YY}(y - \bar{y})^2 + C_{XY}(x - \bar{x})(y - \bar{y}) = R^2 \quad (2.1)$$

O fluxo ISO para cada filtro é determinado pela equação 2.2, onde p_i são os valores de cada pixel i detectados acima do fundo e S a distribuição espacial dos píxeis da isofota:

$$\text{Fluxo}_{(iso)} = \sum_{i \in S} p_i \quad (2.2)$$

A Figura 26 é um exemplo de detecção da abertura iso para uma galáxia. Nesta imagem, foram retiradas as outras detecções para focar na galáxia de nossa amostra.

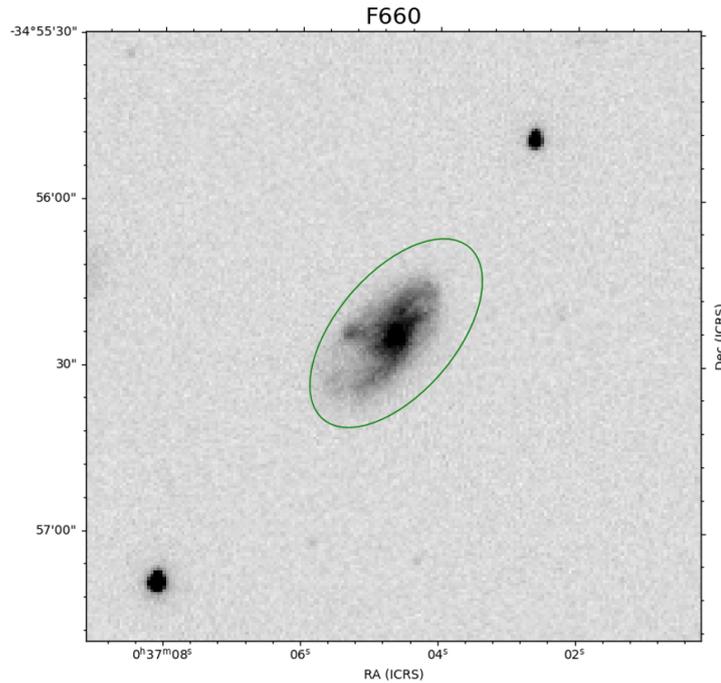


Figura 26 – Exemplo da abertura ISO computada usando o SExtractor pelo S-PLUS para a galáxia peculiar anelada AM 0034-351.

2.1.3 Abertura elíptica variável AUTO

Definida em termos do raio de [Kron \(1980\)](#) e obtida a partir das medições do *primeiro momento* (x , y , A , B , θ , elongação e elipticidade) feitas nos contornos isofotais das detecções. Os eixos A e B da elipse são multiplicados por 6 (o que corresponde aproximadamente a duas vezes o tamanho do contorno isofotal em cada eixo).

O fator de Kron (raio de Kron) é calculado dentro dessa abertura elíptica pela equação [2.3](#) e a elipse de Kron (abertura auto) determinada, onde r_i é o “pseudo-raio reduzido” no pixel i e E a abertura elíptica.

$$\text{Raio de Kron} = \frac{\sum_{i \in E} r_i p_i}{\sum_{i \in E} p_i} \quad (2.3)$$

A abertura elíptica de Kron (abertura auto) é a elipse com o raio de Kron aplicado ao *primeiro momento* do algoritmo. Após a abertura elíptica auto gerada, o fluxo para cada filtro é determinado pela equação [2.4](#), onde K é a abertura elíptica de Kron.

$$\text{Fluxo}_{(auto)} = \sum_{i \in K} p_i \quad (2.4)$$

A [Figura 27](#) é um exemplo de detecção da abertura auto para uma galáxia. Nesta imagem, foram retiradas as outras detecções para focar na galáxia de nossa amostra.

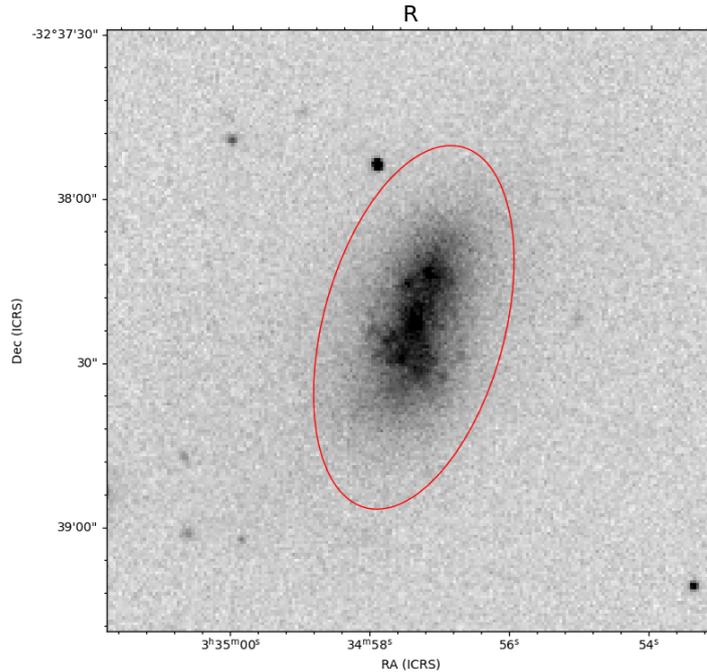


Figura 27 – Exemplo da abertura AUTO em termos do raio de Kron computada usando o SExtractor pelo S-PLUS para a galáxia peculiar anelada AM 0332-324.

2.1.4 Abertura elíptica variável PETRO

Similar à abertura auto, a abertura elíptica variável petro é definida em termos do raio de Petrosian (1976). Uma vez obtida as medições do *primeiro momento* (x , y , A , B , θ , ϵ , alongação e elipticidade) feitas nos contornos isofotais das detecções, os eixos A e B da elipse também são multiplicados por 6 e o fator de Petrosian (raio de Petrosian) é calculado dentro dessa abertura elíptica pela equação 2.5 e a elipse de Petrosian (abertura petro) determinada.

$$\left(\frac{\sum_{0.9r < r_i < 1.1r} p_i}{\sum_{r_i < r} p_i} \right) \cdot \left(\frac{N_{r_i < r}}{N_{0.9r < r_i < 1.1r}} \right) \quad (2.5)$$

A abertura elíptica de Petrosian (abertura petro) é a elipse com o raio de Petrosian aplicado ao *primeiro momento* do algoritmo. Após a abertura elíptica petro gerada, o fluxo das fontes para cada filtro é calculado pela soma dos valores dos píxeis pela equação 2.6, onde P é a abertura elíptica de Petrosian.

$$\text{Fluxo}_{(petro)} = \sum_{i \in P} p_i \quad (2.6)$$

A Figura 28 é um exemplo de detecção da abertura petro para uma galáxia. Nesta imagem, foram retiradas as outras detecções para focar na galáxia de nossa amostra.

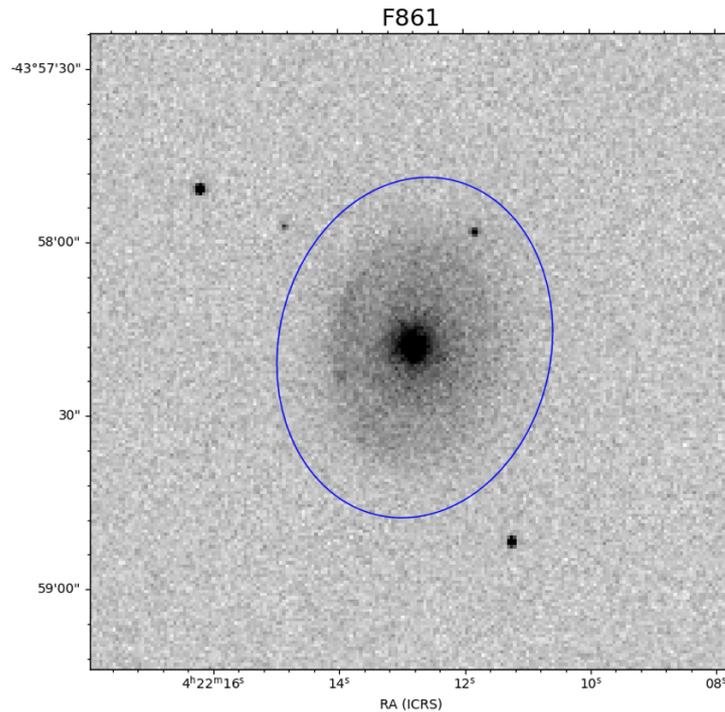


Figura 28 – Exemplo da abertura PETRO em termos do raio de Petrosian computada usando o SExtractor pelo S-PLUS para a galáxia peculiar anelada AM 0420-440.

Todos os parâmetros computados possuem seus respectivos erros estimados e são fornecidos pelo S-PLUS para cada filtro e abertura. O S/N^5 é definido como o fluxo dividido pelo seu erro e para a não detecção em um determinado filtro a magnitude é substituída por 99.

2.2 Dados da amostra

Inicialmente, os objetos de nossa amostra foram selecionadas a partir de catálogos e atlas especializados em galáxias aneladas:

- A catalogue of southern peculiar galaxies and associations de [Arp e Madore \(1987\)](#) lista galáxias na Categoria 6, classificadas com anel bem definido ao redor e quaisquer galáxias morfológicamente parecidas. Os autores fazem uma breve descrição para cada objeto enfatizando aspectos como a direção de um jato ou o número de companheiros aparentes, etc. Todas as galáxias listadas na Categoria 6 foram consideradas neste estudo.
- New observations and a photographic atlas of polar-ring galaxies de [Whitmore et al. \(1990\)](#), possui 157 galáxias divididas em quatro categorias: com anéis polares confirmados cinematicamente (categoria A), bons candidatos com base em sua aparência morfológica (categoria B), possíveis candidatos (categoria C) e objetos possivelmente relacionados (categoria D). Apenas as categorias A e B foram consideradas nesta pesquisa.

⁵ A relação sinal-ruído (S/N) avalia a confiabilidade e a precisão das medições de fluxo luminoso ou de intensidade de um objeto em relação ao ruído de fundo associado a ele.

- A new catalogue of polar-ring galaxies selected from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) de [Moiseev et al. \(2011\)](#), possui 275 objetos classificados como galáxias peculiares com anel polar conforme imagens do SDSS. Este catálogo complementa o de [Whitmore et al. \(1990\)](#) e é baseado nos resultados do projeto Galaxy Zoo. As galáxias de anel polar foram divididas em quatro categorias pelos autores: melhores candidatas, boas candidatas, objetos relacionados a anel polar e anéis muito inclinados à linha de visão (*face on* - vistos quase de frente). Para esta pesquisa, foram considerados apenas os melhores candidatos, bons candidatos e *face on*.
- Atlas and catalog of collisional ring galaxies de [Madore, Nelson e Petrillo \(2009b\)](#), que extraíram as galáxias de [Arp e Madore \(1987\)](#) (onde listam na tabela 1) e complementaram com outras RGs conhecidas da literatura (tabela 2). Este trabalho lista a galáxia alvo e apresenta as posições plausíveis para os possíveis colisores companheiros próximos. Foram considerados apenas os objetos da tabela 2, visto que já tínhamos as informações da tabela 1 por referência do catálogo de [Arp e Madore \(1987\)](#).
- Ring galaxies I, onde [Theys e Spiegel \(1976\)](#) propuseram um esquema de classificação para RGs, em três subclasses: galáxias RE de anéis vazios nítidos; galáxias RN, semelhantes às REs, mas com núcleo descentralizado; e galáxias RK, com nódulos ou condensações dominantes em seus anéis. Utilizaram observações fotométricas e espectroscópicas para estimar propriedades globais das RGs. Deste estudo, foram consideradas 10 galáxias, visto que as outras já faziam parte dos catálogos e atlas anteriores pesquisados.
- Search for faint ring-shaped galaxies in the -77 deg to -87 deg declination interval de [Faúndez-Abans, Cuevas e Hertling \(1994\)](#). Os autores classificam os objetos candidatos a RGs de acordo com a estrutura do anel e a aparência do núcleo. Para nosso critério de amostras peculiares aneladas, foram considerados apenas os objetos classificados com anel tipo spher (esfera), ellip (elipse) e spindle (fuso ou estrutura alongada) pelos autores.
- The visual appearance of the nuclei of ring-shaped galaxies as an alternative classification criterion de [Faúndez-Abans, Hertling e Ramirez \(1992\)](#), classifica prováveis RGs em relação à morfologia do núcleo. Consideramos para nossa lista apenas os objetos classificados pelos autores com anel tipo spher (esfera), ellip (elipse) e spindle (fuso ou estrutura alongada).
- On the morphology of peculiar ring galaxies, onde [Faúndez-Abans e de Oliveira-Abans \(1998\)](#) dividiram as RGs em cinco tipos principais de acordo com a morfologia do anel e do bojo, com base na inspeção visual de objetos selecionados. Todos os objetos listados deste trabalho foram considerados para nosso estudo.

Uma lista inicial⁶ foi criada com todas as galáxias referente aos catálogos e atlas citados acima, com os critérios descritos, e foram divididas em dois grupos distintos: as peculiares e as

⁶ Para visualização da lista, entrar em contato por e-mail: barbaralunarti@gmail.com.

normais, seguindo rigorosamente as classificações previamente estabelecidas pelos trabalhos dos autores consultados. Em seguida, somente os objetos peculiares foram selecionados e atualizadas suas informações de RA (Ascensão Reta, do inglês, *Right Ascension*)⁷ e DEC (Declinação, do inglês, *Declination*)⁸, de acordo com os bancos de dados NASA/IPAC Extragalactic Database e SIMBAD Astronomical Database. As galáxias com nomes iguais (repetidas) foram removidas desta lista.

Em seguida, fizemos uma busca no banco de dados do S-PLUS para filtrar os objetos encontrados. Essa busca é através da Astronomical Data Query Language (ADQL), para realizar consultas astronômicas no banco de dados utilizando a linguagem de programação Python. A ADQL é baseada na Linguagem de Consulta Estruturada (SQL, do inglês Structured Query Language), usada para gerenciar dados em bancos de dados relacionais. A partir de nossa lista de objetos e suas respectivas coordenadas RA e DEC, filtramos as galáxias encontradas no S-PLUS até a última atualização de dados disponíveis (data releases 1, 2, 3 e 4). Uma segunda inspeção individual às nossas amostras foi realizada retirando objetos listados com um nome por um catálogo, sendo o mesmo, porém com designação diferente, por outro catálogo (Exemplo: por ordem de construção de nossa lista em relação aos catálogos e atlas consultados, o objeto FM 351-12 de [Faúndez-Abans e de Oliveira-Abans \(1998\)](#) foi removido porque corresponde à AM 0053-353 do catálogo de [Arp e Madore \(1987\)](#)). Os objetos classificados como galáxias espirais em transição ou nebulosas planetárias, de acordo com os bancos de dados NASA/IPAC Extragalactic Database e SIMBAD Astronomical Database, também foram removidos de nossa lista. Por fim, nossa lista primordial (Apêndice A) para o estudo da fotometria de galáxias aneladas encontradas no S-PLUS possui apenas galáxias classificadas como peculiares conforme autores consultados, não há objetos repetidos mesmo com nomes diferentes e as coordenadas celestes foram atualizadas, totalizando 117 objetos.

As imagens (Anexo A)⁹ por banda e a combinação dos 12 filtros (dois exemplos são as Figuras 29 e 30) foram adquiridas através da função conexão `splusdata.connect`, onde a busca se faz pelas coordenadas RA e DEC do objeto de desejo. Para esta busca, também, pode-se aderir às preferências de filtros, isolados ou combinados, e o tamanho da imagem. Foram realizadas quatro buscas ADQL para obter: as imagens (no formato *FITS Figure*) por filtro em escala preto e branco e os dados dos parâmetros das tabelas para gerar as aberturas elípticas; os dados das magnitudes para cada filtro e seus respectivos erros, para as aberturas iso, auto e petro (separadamente), comparando os valores e as propriedades dos objetos. Geramos as três aberturas elípticas conforme dados obtidos das tabelas e analisamos a fotometria em cada filtro de nossa amostra.

⁷ Ascensão reta: é a medida ao longo do equador celeste, partindo do ponto vernal (ponto de início do equador celeste) em direção ao leste, usada para indicar a posição leste-oeste de um objeto no céu. A ascensão reta varia entre 0h e 24h (ou entre 0° e 360°) aumentando para leste.

⁸ Declinação: é a medida perpendicularmente ao equador celeste, indo de -90° (sul celeste) a +90° (norte celeste), usada para indicar a posição norte-sul de um objeto no céu.

⁹ Imagens e informações dos dados utilizados: <https://github.com/barbaralunarti>.

3

Análise de Resultados

3.1 Fotometria das amostras

A combinação dos doze filtros e a fotometria de diferentes aberturas do S-PLUS (Figuras 29 e 30), desempenham um papel fundamental na visualização de dados astronômicos e na realização de uma ampla gama de estudos científicos, por exemplo, obter informações de propriedades das populações estelares como idade e metalicidade, que necessitariam de espectroscopia. Isto posto, a qualidade fotométrica dos *surveys* é importante para a ciência que se aplica a estes dados.

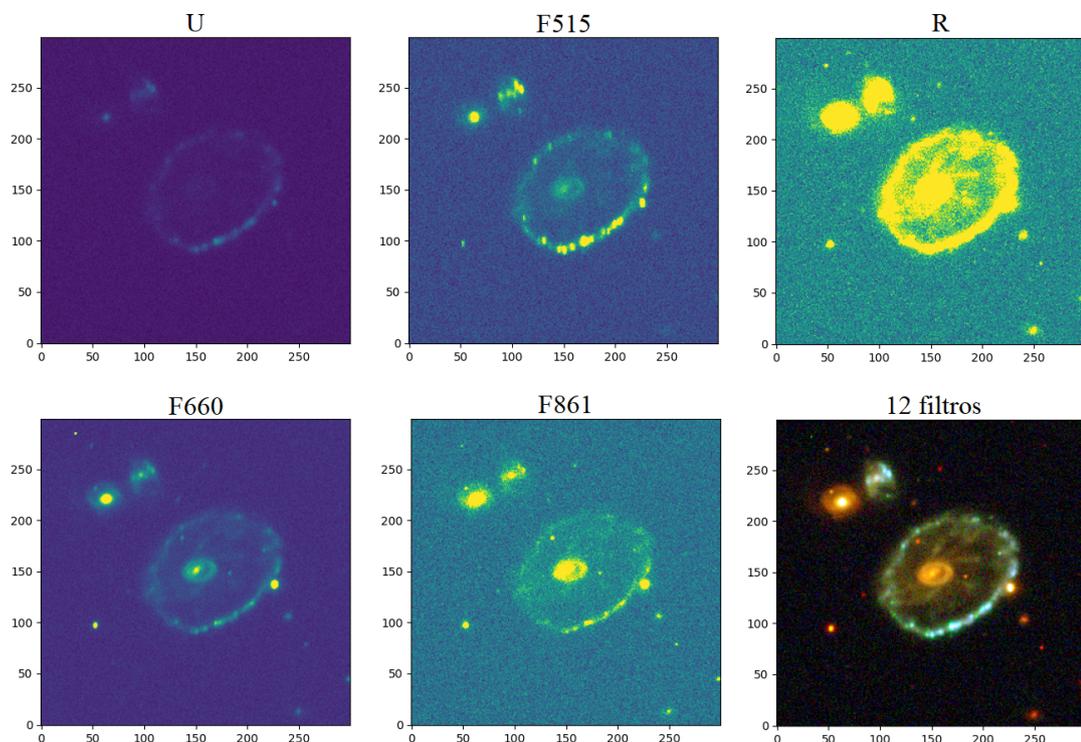


Figura 29 – Observa-se na galáxia AM 0035-335 pelas intensidades das cores, as concentrações e distribuições das estrelas e as características das regiões do bojo e dos anéis, interno e externo. O anel externo, elíptico, amplo e com nódulos possui uma tonalidade azulada, com estrelas jovens da população 1. O bojo e o anel interno, mais avermelhado, com estrelas mais velhas da população 2. Podemos ver também, vários “raios” ligando os anéis, como uma possível trilha evolutiva de estrelas.

Podemos observar, através da combinação dos doze filtros (as imagens encontram-se no Anexo A), a riqueza de informações sobre as galáxias de nossa amostra, como as características elípticas ou circulares dos anéis, presença de um anel interno próximo ao bojo, as diversas cores que as estrelas apresentam, refletindo suas diferentes idades, e também regiões de concentração de poeira e gás. Em particular, o filtro J0660 ($H\alpha$) é satisfatório para estudar hidrogênio até desvios para o vermelho de $z \approx 0.015$, ferramenta importante para medir a taxa de formação estelar (Almeida-Fernandes et al., 2022).

Mas qual a qualidade fotométrica para estes objetos peculiares? Devido à sua morfologia irregular, anéis extensos, interação em andamento e efeitos de maré, é essencial verificar a fotometria de abertura nos objetos, e se as aberturas elípticas são confiáveis para nossa amostra.

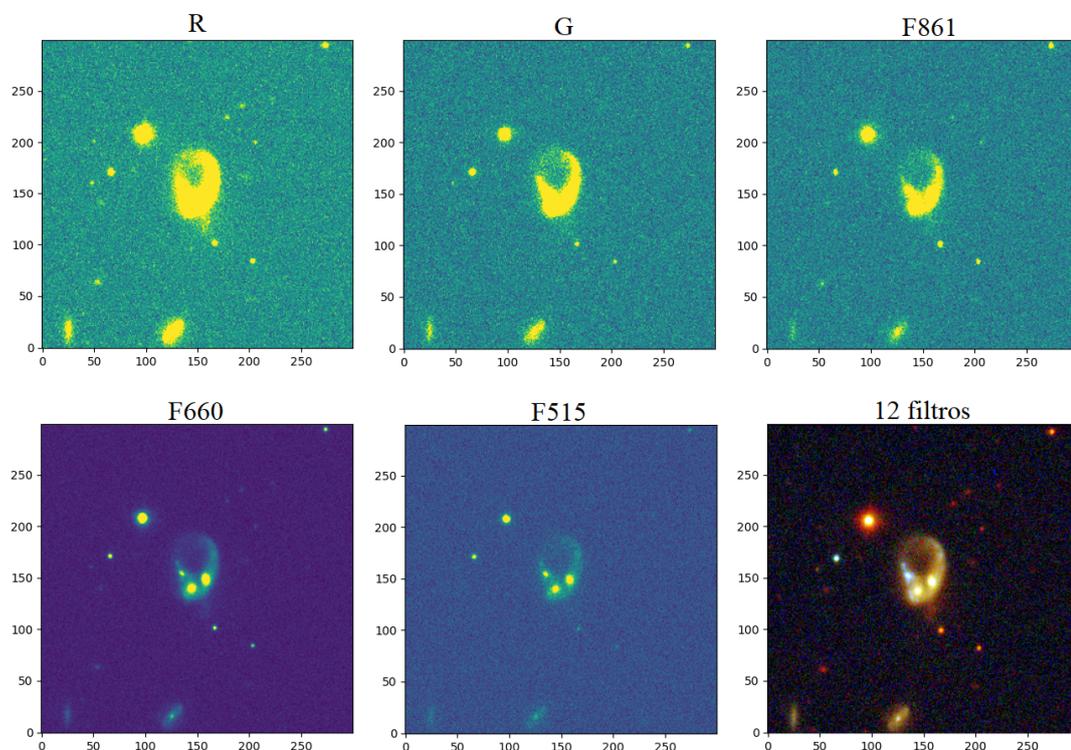


Figura 30 – A galáxia AM 0417-391, resultado da colisão entre duas galáxias, exhibe nódulos marcantes no anel, não apresentando bojo na região central nem deslocado.

As tabelas obtidas do S-PLUS contêm dados de todas as fontes detectáveis na imagem. Portanto, foi necessário remover as detecções que não faziam parte do nosso objeto de estudo, a fim de nos concentrarmos nos dados de nosso interesse. Isso foi feito ao analisar as informações de cada linha das tabelas e selecionar apenas os dados referentes à nossa galáxia.

Para algumas galáxias (Figura 31) as aberturas parecem abranger bem seus formatos, logo, podemos dizer que a fotometria é confiável, e desta forma, somos capazes de analisar as informações de suas magnitudes e fluxos para todos os filtros, comparando qualidade de leitura para cada abertura, e também, realizar a distribuição espectral de energia (a partir dos dados fotométricos, temos apenas uma visão de como seria o espectro da galáxia, porém, para

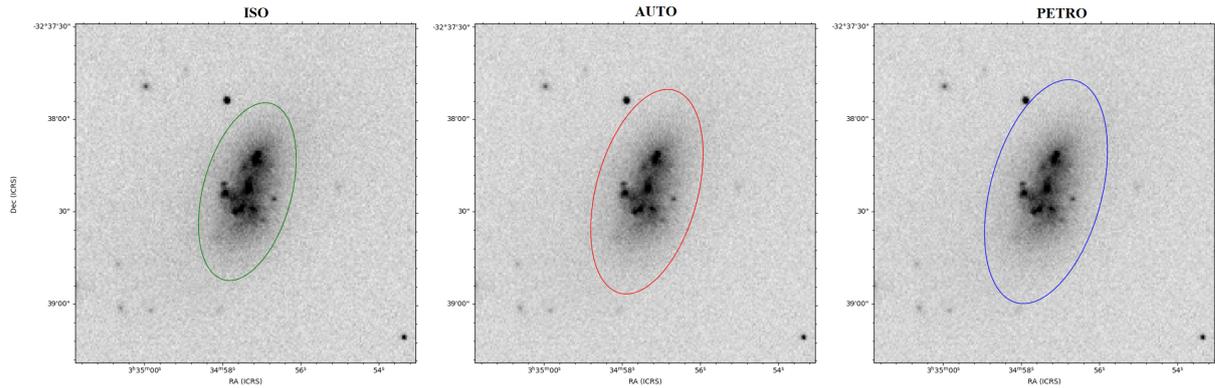


Figura 31 – Galáxia AM 0332-324 vista com o filtro H α : observa-se que as três aberturas elípticas abrangem bem a galáxia.

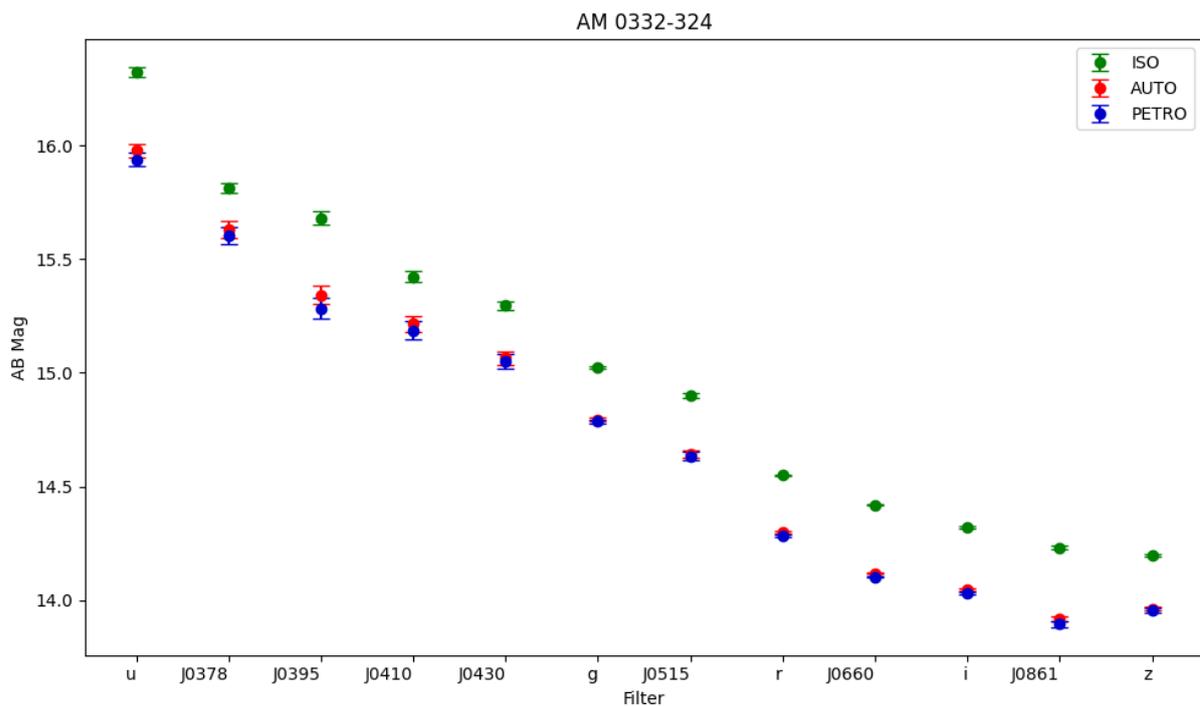


Figura 32 – Galáxia AM 0332-324: visualização da leitura das magnitudes em cada abertura para os 12 filtros e suas respectivas barras de erro.

afirmarmos tais propriedades, é necessário realizar espectroscopia) (Figura 32); para outras (Figuras 33), não é possível concordar.

Vimos que não podemos apenas obter os dados fotométricos das aberturas e gerar os gráficos sem antes realizar uma análise individual de nossas galáxias. Logo, para um objeto mais extenso, com caudas de maré ou outras peculiaridades (como os anéis), outros píxeis de detecção são calculados com elipses separadas da elipse da galáxia. Isso se deve à exatidão de performance do algoritmo do SExtractor para um corpo extenso. Assim, para estes objetos, apenas as informações presentes na linha específica da coordenada RA e DEC da galáxia na tabela, traz somente os dados de uma região, ou seja, uma parte da galáxia (como mostra a Figura 33).

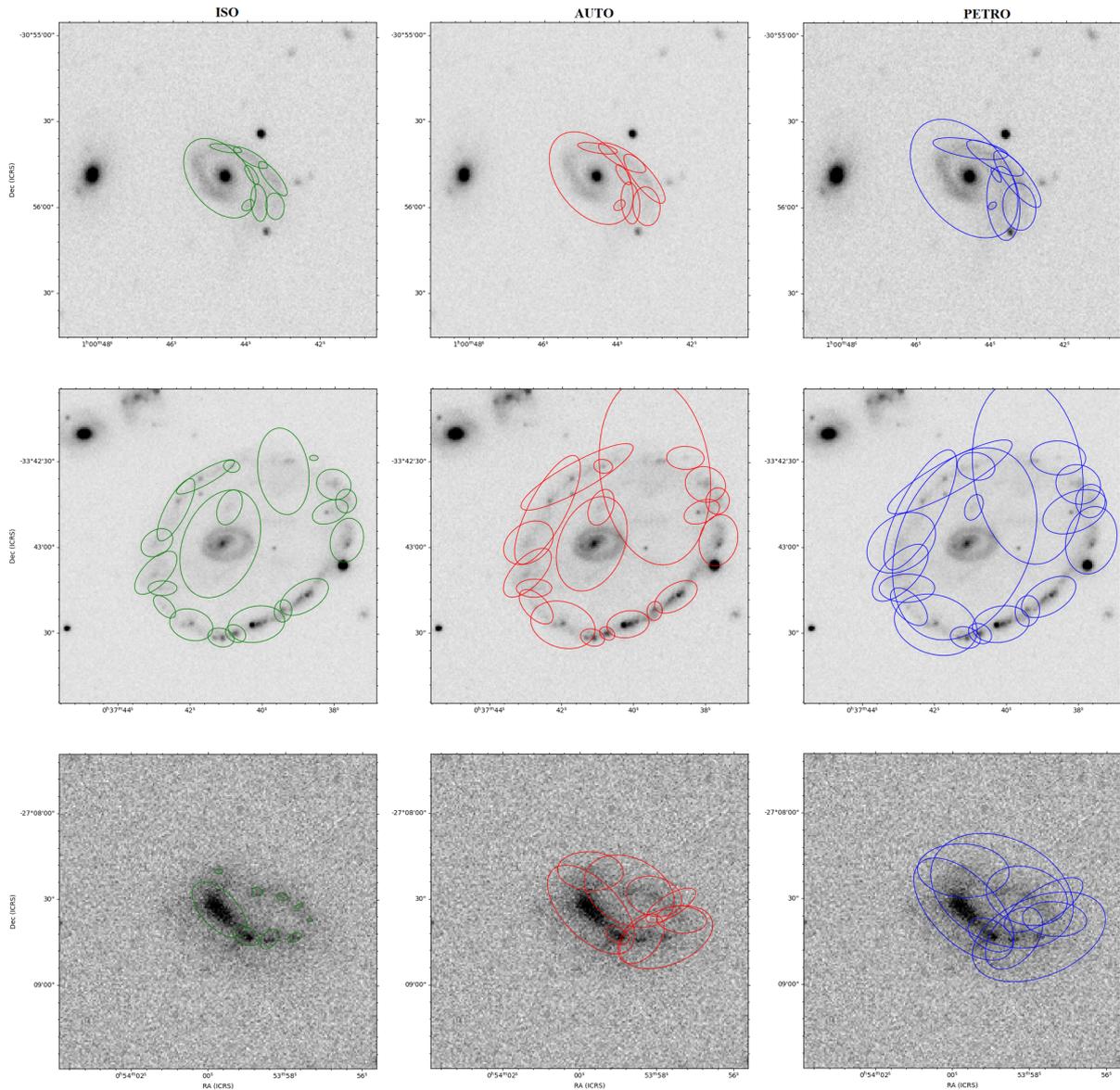


Figura 33 – Do topo para baixo: Galáxias AM 0058-311, AM 0035-335 e AM 0051-272 vistas com o filtro R. Para as três aberturas é possível ver várias leituras de partes das galáxias, logo, conseguimos informações dessas regiões separadas, e não do objeto como um todo.

Nossa amostra (ver detalhes na Tabela 3) foi dividida em dois grupos: as galáxias que possuem qualidade fotométrica para as três aberturas (representadas por “sim” na tabela); e as que não possuem (representadas por “não”). Com essa divisão, analisamos os dados para cada filtro, comparando as barras de erro e características, como os diferentes formatos de bojo e anéis, devido à importância dos doze filtros disponíveis no S-PLUS.

Abaixo mostramos dois exemplos distintos, nas Figuras 34 e 36, e seus respectivos gráficos, que representa para a galáxia A 03364905, que uma elipse para cada abertura abrange toda sua extensão (Figura 35), e para a AM 0330-324, que três elipses para cada abertura foram geradas para envolver seu corpo (Figuras 37, 38 e 39).

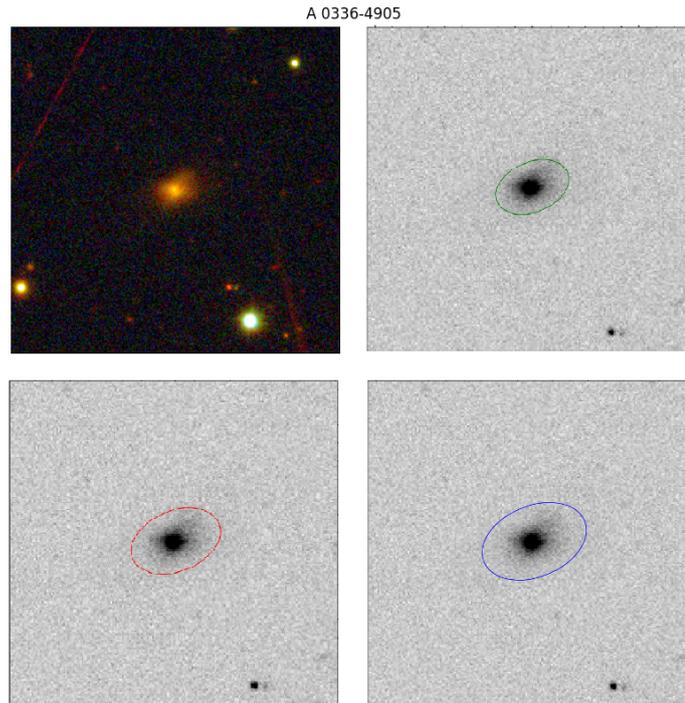


Figura 34 – Visualização da galáxia A 03364905 (Anon 0336-4905) (Figura 35) com os doze filtros e as aberturas geradas. Apenas uma elipse de cada abertura foi necessária para abranger a galáxia. É notável pela imagem dos doze filtros sua coloração predominantemente vermelha.

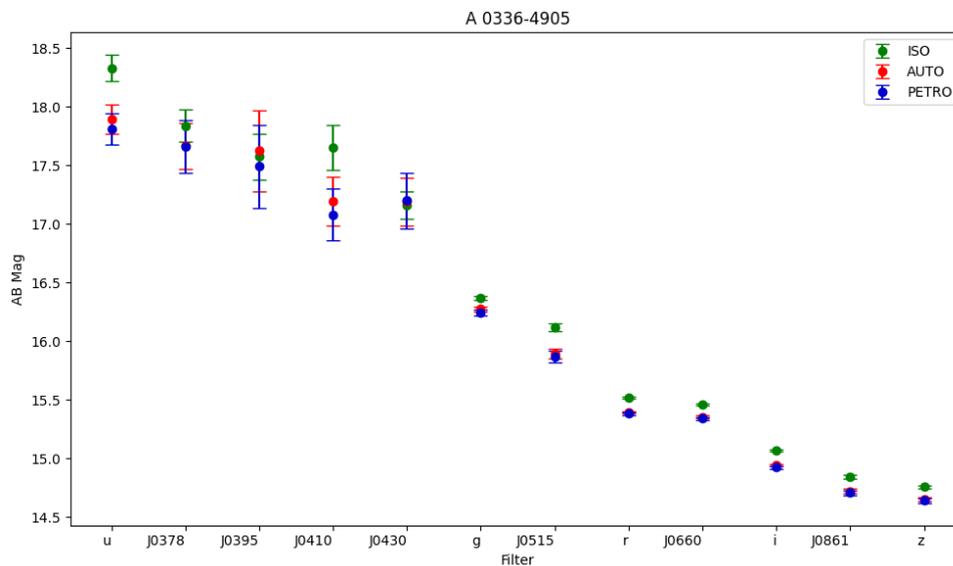


Figura 35 – Esta galáxia possui qualidade de detecção do objeto para todos os filtros. Podemos observar maior brilho em $H\alpha$, J0861 (tripletto de Ca) e J0515 (tripletto de Mgb), provenientes de estrelas jovens, e riz realçando estrelas velhas e poeira interestelar.

Removemos determinadas galáxias de nossa análise de dados com base nos seguintes critérios: (1) galáxias com barras de erro significativamente grandes (acima da média dos erros, como mostrado na Figura 38); (2) galáxias para as quais as medições não foram realizadas (indicadas pelo valor 99 nas tabelas, conforme exemplo da Figura 39). Esses critérios foram

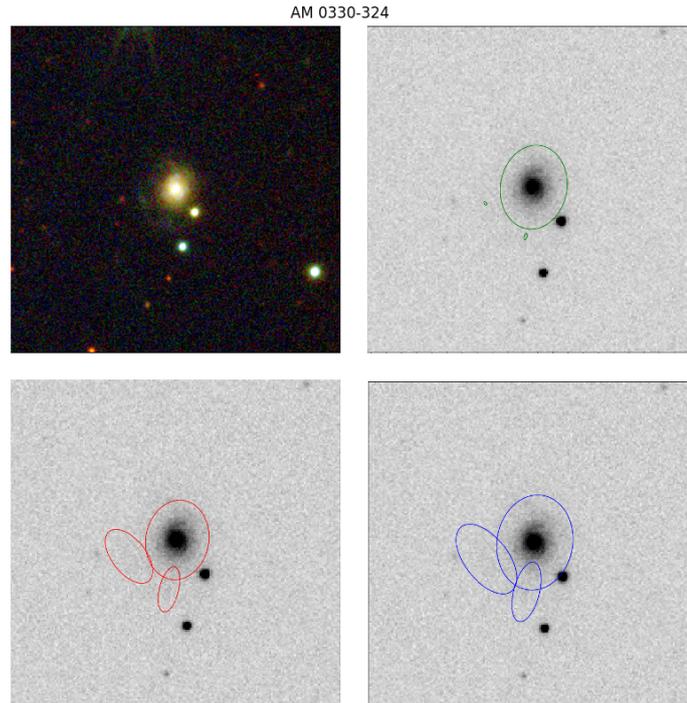


Figura 36 – Visualização da galáxia AM 0330-324 (e Figuras 37, 38 e 39) com os doze filtros e as aberturas geradas. Três elipses para cada abertura foram necessárias para envolver toda a galáxia. Ela apresenta um anel difuso e um bojo no anel ou levemente deslocado dele.

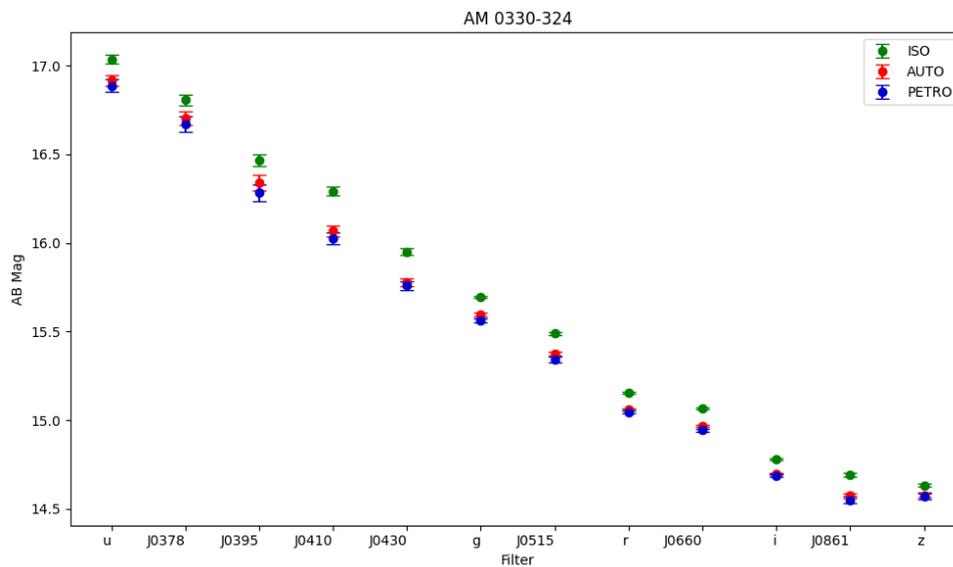


Figura 37 – Esta galáxia é um exemplo de fotometria não confiável, pois possui leitura de magnitudes de três regiões (elipses): bojo e duas regiões no anel. Este gráfico representa a área do bojo.

aplicados a todas as galáxias cujas aberturas fotométricas apresentam qualidade de detecção do objeto e para as galáxias com qualidade fotométrica não confiável (com mais de uma detecção por objeto), sendo que para estas em específico, utilizamos os dados correspondentes à região do bojo ou ao anel mais proeminente, com o objetivo de analisar e comparar as propriedades de

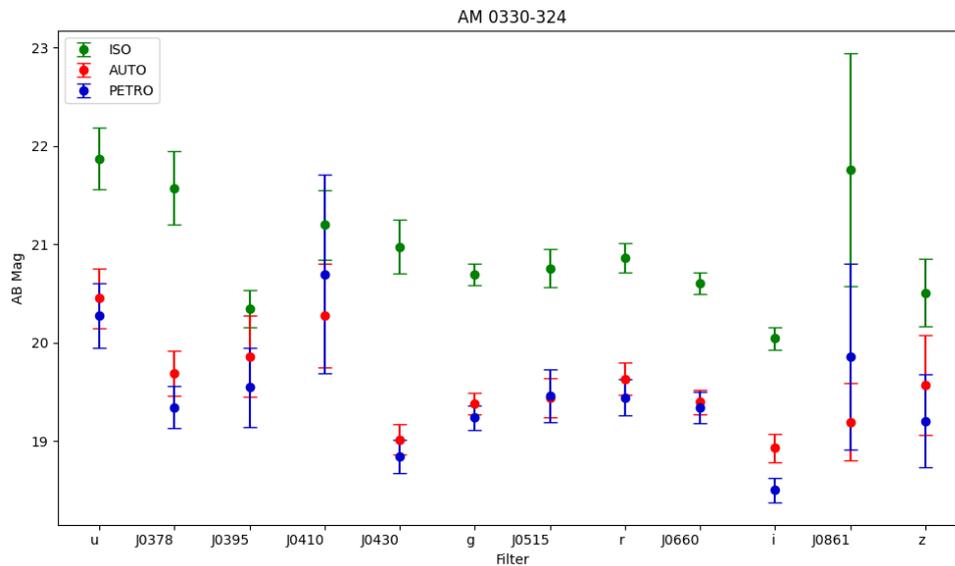


Figura 38 – Este gráfico representa uma região do anel difuso, logo, há maior barra de erro na leitura das magnitudes.

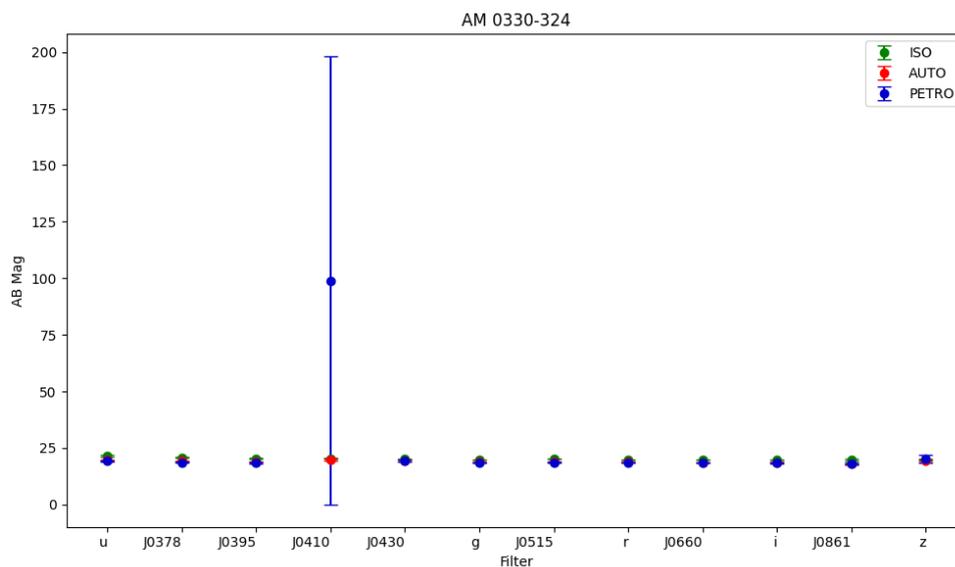


Figura 39 – Este gráfico mostra a segunda região do anel. Por ser uma região muito difusa, percebe-se que a abertura PETRO para o filtro J0410 ($H\delta$) não faz leitura da magnitude, representado pelo valor 99.

todos os objetos da amostra.

Para separar os objetos com erros acima da média dos valores, utilizamos a representação gráfica de *boxplot* (Figura 40). O *boxplot* é uma ferramenta que resume a distribuição de um conjunto de dados, destacando a mediana, os quartis e a dispersão geral dos valores. Ele também identifica a presença de *outliers* — pontos de dados que se afastam significativamente dos demais em um conjunto de dados. Além disso, o *boxplot* facilita a visualização de padrões ou discrepâncias nos dados, uma maneira de avaliar a variabilidade e a simetria da distribuição.

Nesta representação gráfica da distribuição dos valores das magnitudes e respectivos

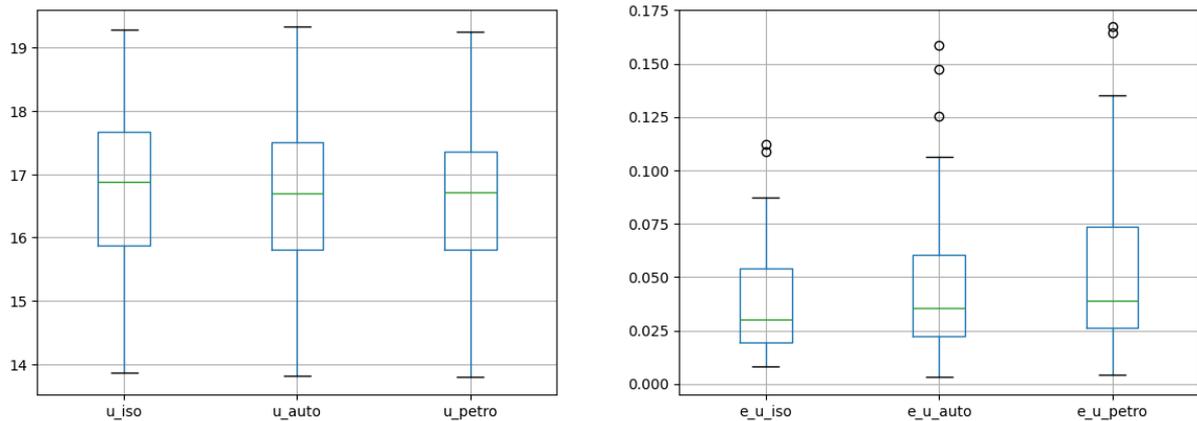


Figura 40 – Representação gráfica da distribuição dos valores das magnitudes (esquerda) e respectivos erros (direita) para o filtro U. Os dados fora da faixa whiskers são considerados outliers e são medições de erro acima da média dos valores.

erros, a linha verde dentro do retângulo representa a mediana (valor que divide os dados em duas metades iguais); a região abaixo e acima da mediana dentro do retângulo são respectivamente o primeiro quartil (valor que separa os 25% valores inferiores do restante) e terceiro quartil (valor que separa os 25% valores superiores dos dados do restante); e *whiskers* (linhas que se estendem a partir do retângulo até os valores extremos dentro de 1,5 vezes a diferença entre terceiro e primeiro quartil). Os dados fora da faixa *whiskers* são considerados *outliers* e são mostrados como pontos individuais. Esta análise de *outliers* foi feita para separar valores de erro muito acima da média dos erros, para melhor visualização gráfica.

Uma outra visão comparativa entre as medições das três aberturas foi realizada em relação aos valores das magnitudes e erros (o Anexo B possui todas as galáxias da amostra com exceção apenas dos objetos que a magnitude não foi medida). Um exemplo são as Figuras 44, 45 e 46, onde podemos comparar dois filtros entre si, o filtro de banda larga R e o filtro de banda estreita J0430. Como esperado, observa-se que quanto maior a magnitude do objeto (ou seja, menor seu brilho), maior será a probabilidade e valor da barra de erro¹.

Nesta comparação entre as aberturas, geramos um gráfico utilizando a função identidade para visualizar melhor as magnitudes e seus respectivos erros. O gráfico de identidade segue uma proporção de 1:1, ou seja, é uma função que retorna o próprio valor de entrada. Isso nos permite analisar o quão próximas as magnitudes e os erros de cada abertura estão entre si, em comparação com a reta da função identidade. Quanto mais próxima uma medida estiver dessa reta, mais semelhante é a magnitude medida do objeto entre as diferentes aberturas.

Analisando os dados para as três aberturas de todas as galáxias em um mesmo gráfico (dois exemplos são as Figuras 41, 42 e 43), percebe-se que a abertura ISO tem uma medição de magnitude ligeiramente maior que as aberturas AUTO e PETRO, e uma menor barra de erro. A abertura PETRO, em geral, possui uma medição de valor menor que as outras duas aberturas,

¹ Imagens e informações dos dados utilizados: <https://github.com/barbaralunarti>.

porém, com maior barra de erro. A visualização das três aberturas de todas as galáxias por filtro está disponível no Anexo B.2.

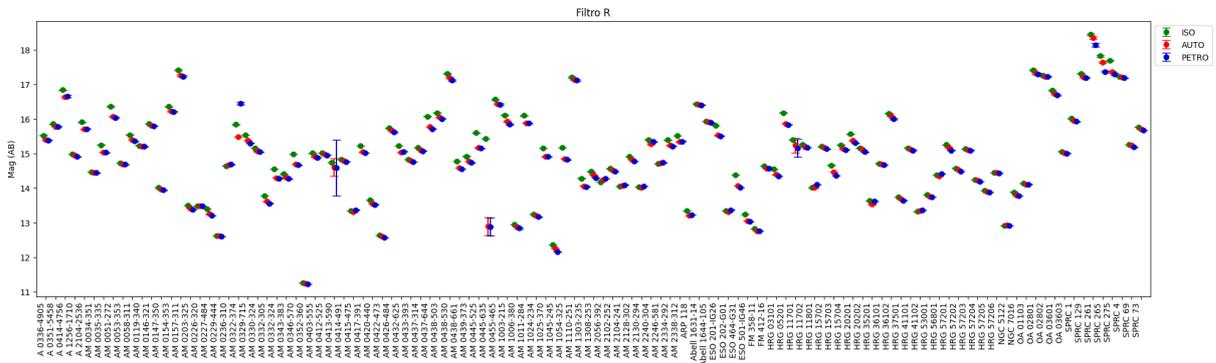


Figura 41 – Visualização das três aberturas para todas as galáxias no filtro R. As cores correspondentes às aberturas estão descritas na legenda do gráfico.

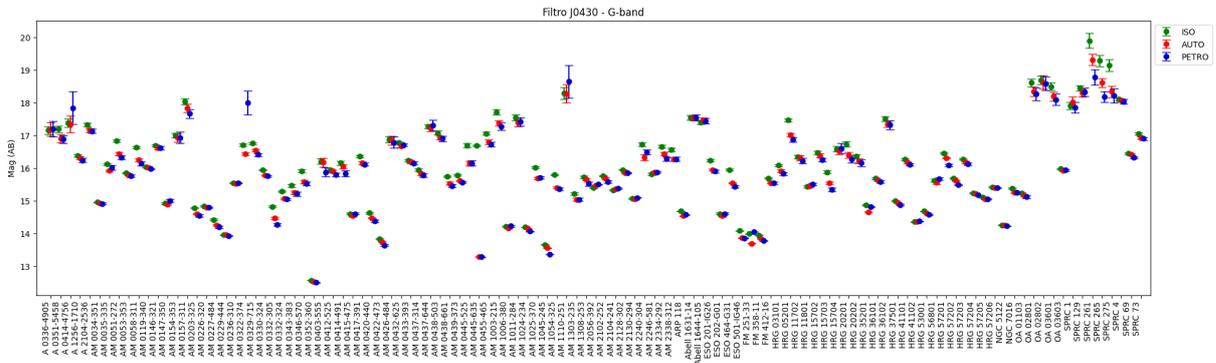


Figura 42 – Visualização das três aberturas para todas as galáxias no filtro J0430.

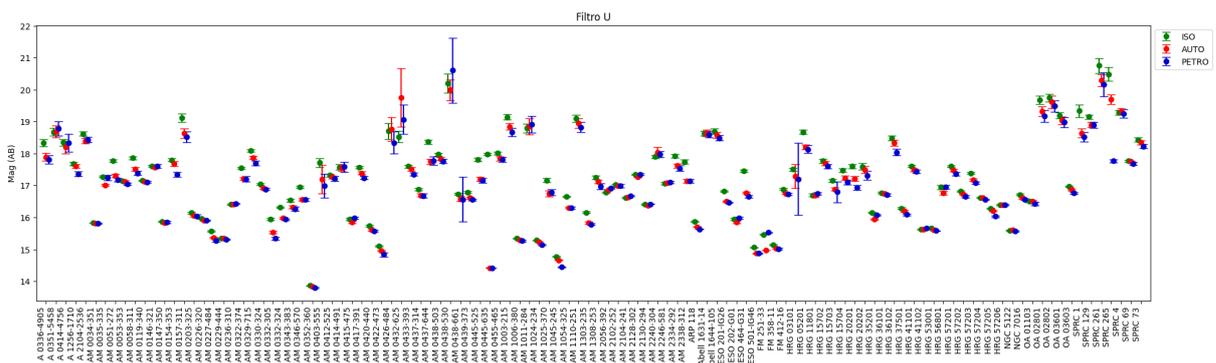


Figura 43 – Visualização das três aberturas para todas as galáxias no filtro U.

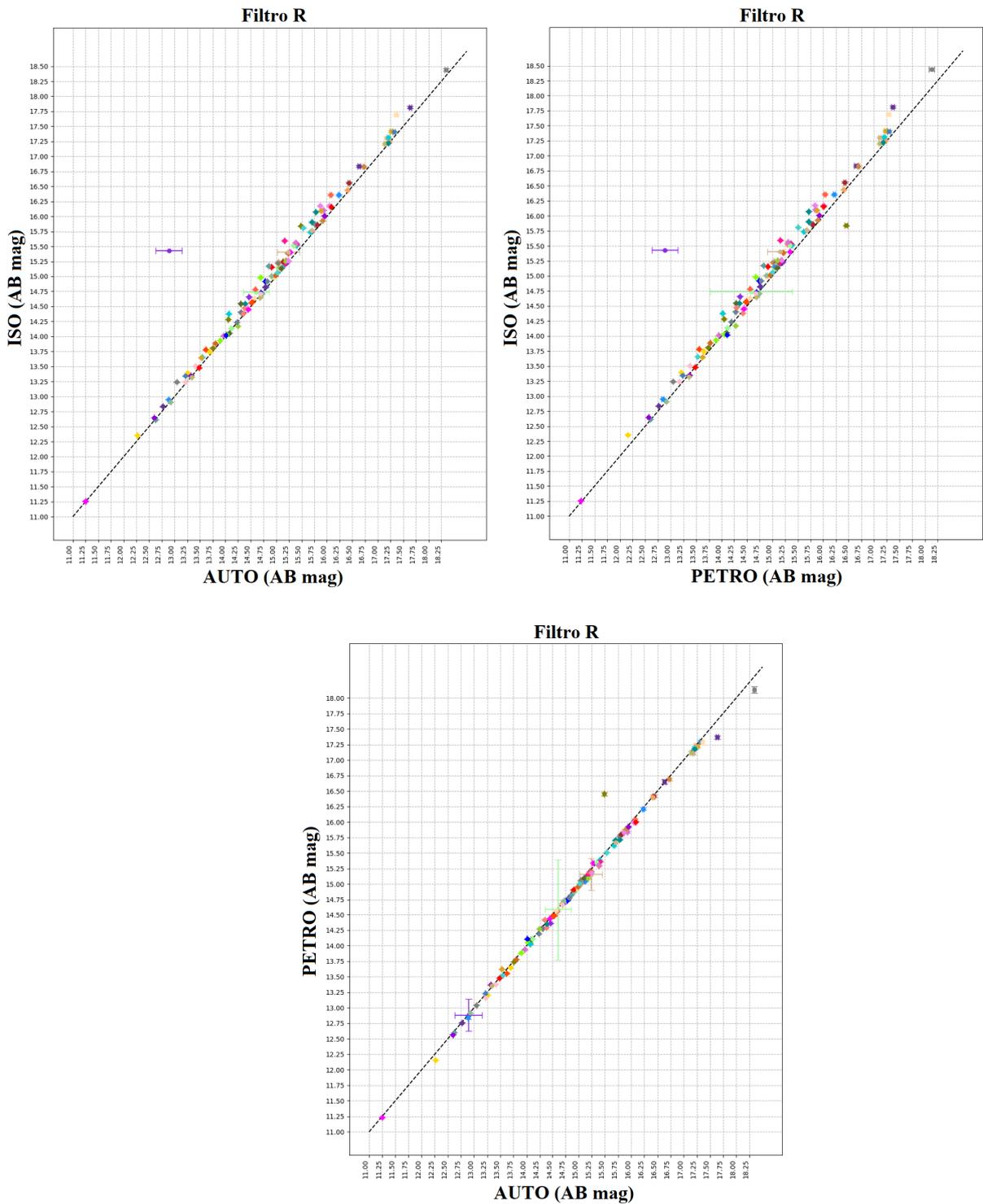


Figura 44 – Comparação entre as aberturas para o filtro R. Em todos os três gráficos, cada cor representa um objeto específico, de modo que a mesma cor corresponde ao mesmo objeto em todos eles. Pela função identidade (pontilhado na diagonal) é possível observar uma diferença entre os valores para as três aberturas, devido aos métodos de cálculo das magnitudes de cada uma. Nota-se também que para algumas galáxias há uma barra de erro maior para as medições das aberturas AUTO e PETRO.

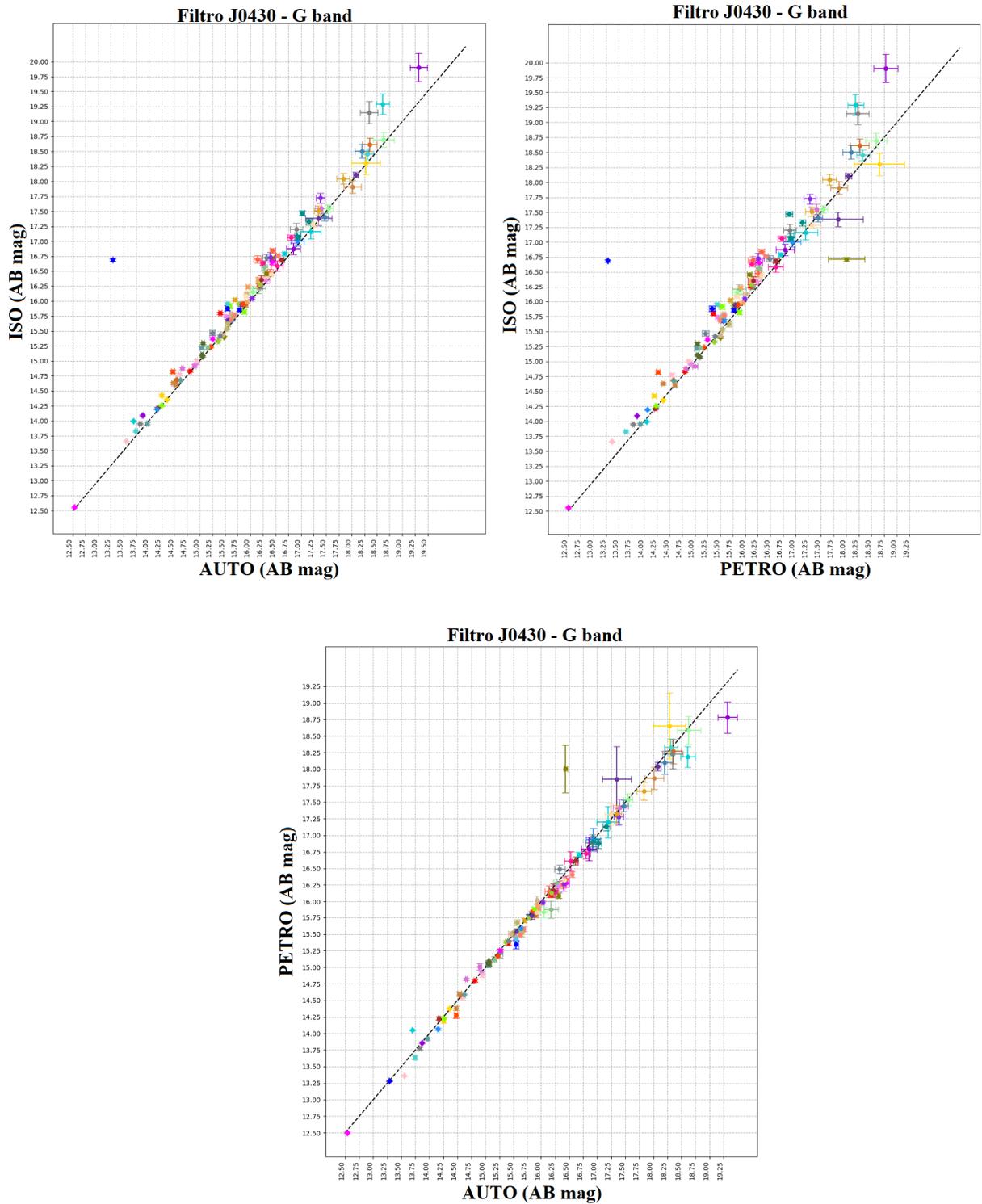


Figura 45 – Comparação entre as aberturas para o filtro J0430. Em todos os três gráficos, cada cor representa um objeto específico, de modo que a mesma cor corresponde ao mesmo objeto em todos eles. Como esperado, para objetos de brilho mais fraco, há um maior erro nas medições para todas as aberturas.

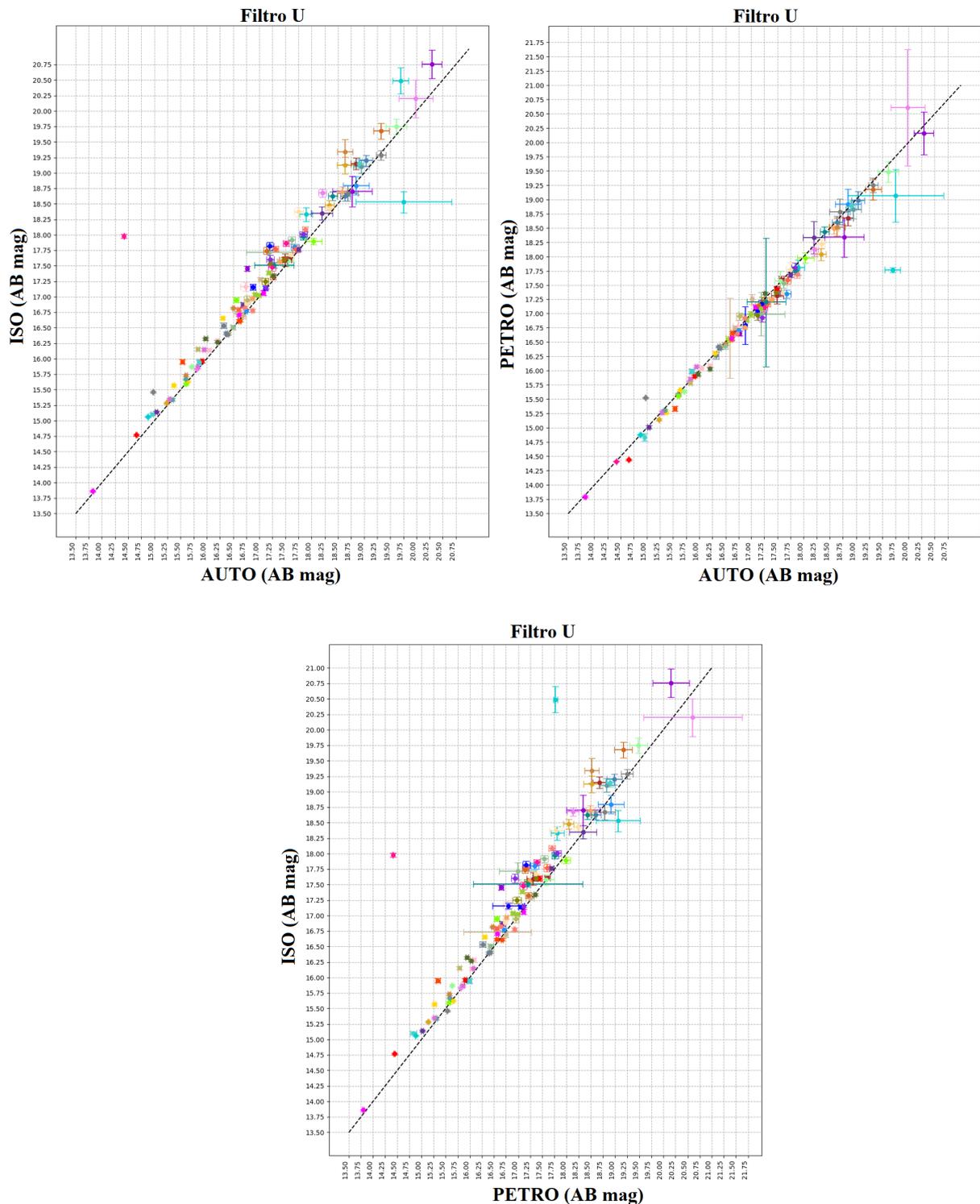


Figura 46 – Comparação entre as aberturas para o filtro U. Em todos os três gráficos, cada cor representa um objeto específico, de modo que a mesma cor corresponde ao mesmo objeto em todos eles. Como esperado, para objetos de brilho mais fraco, há um maior erro nas medições para todas as aberturas.

4

Considerações Finais

Neste trabalho realizamos o estudo da qualidade fotométrica do sistema de 12 filtros (combinação de bandas estreitas e largas) do Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS) para galáxias peculiares aneladas (RGs). As RGs fazem parte de um grupo das galáxias irregulares e possuem o formato de um anel. Sua estrutura perturbada e anelada é resultado de colisões galácticas e interações entre forças de maré, um desafio para o estudo da fotometria, principalmente com aberturas elípticas. A qualidade da fotometria para estes objetos foi analisada nesta pesquisa para três aberturas elípticas utilizadas pelo S-PLUS: AUTO, ISO e PETRO. Os dados utilizados estão disponíveis pela busca ADQL do *survey*, como imagens FITS Figure, dados fotométricos, astrométricos e parâmetros referentes às aberturas.

A análise da fotometria de abertura para cada RG é importante para uma melhor visualização das características e informações que podemos extrair desses objetos, visto sua natureza morfológica irregular. Para estes objetos irregulares é necessária uma inspeção individual, como foi realizada nesta pesquisa, separando as galáxias que podemos dizer que a detecção é de qualidade (fotometria confiável), pois compreende todo o objeto, dos que não podemos usar para análise de dados. Quando uma única abertura elíptica não abrange adequadamente o corpo e contorno da galáxia, o ideal é refazer a fotometria com uma técnica mais apropriada para o objeto, ajustando e testando os parâmetros para encontrar a melhor elipse que envolva a galáxia, ou a combinação de elipses, ou outros métodos e ferramentas como utilização de múltiplas elipses concêntricas (com diferentes tamanhos e excentricidades que podem capturar a variação na distribuição de luz em diferentes partes da galáxia), construir perfis de brilho superficial (entender como a intensidade da luz varia com a distância do centro da galáxia), dentre outros. Investigar a qualidade das detecções e como a fotometria é realizada, é fundamental para obtermos o mais próximo possível a característica e propriedades físicas dos objetos. Uma vez que isso não é feito, principalmente para galáxias peculiares, informações subestimadas ou superestimadas levam a conclusões incorretas.

Para nossa amostra com 117 galáxias, foram separados os objetos de fotometria “confiável” (a abertura abrange toda a extensão do objeto), e comparadas as medições fotométricas (magnitudes e erros) para as três aberturas nos doze filtros do S-PLUS. Cada abertura possui um método de medição do fluxo e respectivas incertezas (Seção 2.1), e para a maioria das galáxias separadas

de nossa amostra, os valores são bem próximos entre si dentro da barra de erro. Desta forma, percebe-se que a medição dos valores das magnitudes possuem uma confiabilidade. Outro ponto importante e esperado, é observado aos objetos que possuem brilho fraco, apresentando maior probabilidade de erro na medição. Há também, poucas exceções de valores com medições de erro acima da média.

Concluimos que para os objetos de morfologia irregular, a fotometria de abertura elíptica automática não é confiável e aplicável a todos de uma amostra. É necessária uma inspeção individual, analisando como a abertura é feita e para cada galáxia. Os valores de magnitudes que possuem barras de erro de medição significativos ou extrapolados, é importante que sejam excluídos da análise, porque não refletem as reais propriedades da galáxia, e a fotometria deve ser refeita. Com isso, para trabalhos futuros, ao avaliar como a detecção dos objetos é realizada e sua qualidade, podemos por exemplo, aplicar os dados do S-PLUS em modelos que interpretam as distribuições espectrais de energia das galáxias, para obter informações sobre a formação, massa, metalicidade, populações estelares, e atenuação da poeira, investigando os processos evolutivos das galáxias e propriedades do meio interestelar. Outro exemplo de trabalho para estas imagens é a reclassificação destes objetos, visto que os dados do S-PLUS possuem uma boa resolução e observamos que algumas galáxias de nossa amostra são espirais, como é o caso de ESO 501-IG46.

Referências

- Akhil, K. R.; Kartha, S. S.; Mathew, B. Beyond the rings: Polar ring galaxy NGC 4262 and its globular cluster system. v. 530, n. 3, p. 2907–2918, maio 2024. Citado 2 vezes nas páginas [33](#) e [34](#).
- Almeida-Fernandes, F. et al. Data Release 2 of S-PLUS: Accurate template-fitting based photometry covering 1000 deg² in 12 optical filters. v. 511, n. 3, p. 4590–4618, abr. 2022. Citado 2 vezes nas páginas [38](#) e [47](#).
- Appleton, P. N. et al. Massive Star Formation and Dust in Collisional Ring Galaxies: From GALEX to Spitzer. In: Chary, R. R.; Teplitz, H. I.; Sheth, K. (Ed.). *Infrared Diagnostics of Galaxy Evolution*. [S.l.: s.n.], 2008. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 381), p. 128. Citado na página [27](#).
- Appleton, P. N.; Struck-Marcell, C. Collisional ring galaxies. v. 16, p. 111–220, jan. 1996. Citado 3 vezes nas páginas [20](#), [21](#) e [25](#).
- Arp, H. Atlas of peculiar galaxies. nov. 1966. Citado na página [21](#).
- Arp, H. C.; Madore, B. A catalogue of southern peculiar galaxies and associations. 1987. Citado 5 vezes nas páginas [21](#), [22](#), [43](#), [44](#) e [45](#).
- Baade, W. The Resolution of Messier 32, NGC 205, and the Central Region of the Andromeda Nebula. v. 100, p. 137, set. 1944. Citado na página [13](#).
- Bannikova, E. Y. The structure and stability of orbits in Hoag-like ring systems. v. 476, n. 3, p. 3269–3277, maio 2018. Citado 2 vezes nas páginas [25](#) e [26](#).
- Bertin, E. SCAMP: Automatic Astrometric and Photometric Calibration. out. 2010. Citado na página [39](#).
- Bertin, E. SWarp: Resampling and Co-adding FITS Images Together. out. 2010. Citado na página [39](#).
- Bertin, E. PSFEx: Point Spread Function Extractor. jan. 2013. Citado na página [39](#).
- Bertin, E.; Arnouts, S. SExtractor: Software for source extraction. v. 117, p. 393–404, jun. 1996. Citado na página [39](#).
- Bertin, E.; Arnouts, S. SExtractor: Source Extractor. out. 2010. Citado na página [39](#).
- Binney, J.; Tremaine, S. Galactic dynamics. 1987. Citado na página [22](#).
- Buta, R. The Catalog of Southern Ringed Galaxies. v. 96, p. 39, jan. 1995. Citado na página [22](#).
- Cannon, R. D.; Lloyd, C.; Penston, M. V. Ring galaxies. *The Observatory*, v. 90, p. 153–154, ago. 1970. Citado na página [21](#).
- Cenarro, A. J. et al. J-PLUS: The Javalambre Photometric Local Universe Survey. v. 622, p. A176, fev. 2019. Citado na página [37](#).

- Choudhuri, A. R. *Astrophysics for physicists*. Cambridge University Press, Cambridge, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 13, 17 e 19.
- da Cunha, E.; Charlot, S. MAGPHYS: Multi-wavelength Analysis of Galaxy Physical Properties. jun. 2011. Citado na página 34.
- Faúndez-Abans, M.; Cuevas, H. L.; Hertling, G. P. Search for faint ring-shaped galaxies in the -77deg to -87deg declination interval. v. 104, p. 1–7, abr. 1994. Citado na página 44.
- Faúndez-Abans, M.; de Oliveira-Abans, M. On the morphology of peculiar ring galaxies. v. 129, p. 357–361, abr. 1998. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 44 e 45.
- Faúndez-Abans, M. et al. FM 047-02: a collisional pair of galaxies with a ring. v. 558, p. A13, out. 2013. Citado na página 25.
- Faúndez-Abans, M.; Hertling, G. P.; Ramirez, A. C. The visual appearance of the nuclei of ring-shaped galaxies as an alternative classification criterion. v. 94, p. 245–250, ago. 1992. Citado na página 44.
- Few, J. M. A.; Madore, B. F. Ring galaxies- II. Classification and statistics. v. 222, p. 673–682, out. 1986. Citado na página 22.
- Filho, K. d. S. O.; Saraiva, M. d. F. O. Galáxias. Instituto de Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2023. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/galax/index.htm>>. Acesso em: 28 set 2023. Citado 7 vezes nas páginas 13, 16, 17, 18, 30, 32 e 34.
- Fogarty, L. et al. SWIFT observations of the Arp 147 ring galaxy system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 417, n. 2, p. 835–844, 10 2011. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19066.x>>. Citado na página 21.
- Fosbury, R. A. E.; Hawarden, T. G. A0035 “the cartwheel” a large southern ring galaxy. v. 178, p. 473–487, fev. 1977. Citado na página 27.
- Freeman, K. C.; de Vaucouleurs, G. An interpretation of ring galaxies and the properties of intergalactic gas clouds. v. 194, p. 569–585, dez. 1974. Citado na página 24.
- Hubble, E. P. Cepheids in spiral nebulae. *The Observatory*, v. 48, p. 139–142, maio 1925. Citado na página 12.
- Hubble, E. P. *Realm of the nebulae*. Yale University Press, New Heaven, 1936. Citado na página 14.
- Kant, I. *Allgemeine naturgeschichte und theorie des himmels*. Alemanha, 1755. Citado na página 12.
- Kron, R. G. Photometry of a complete sample of faint galaxies. v. 43, p. 305–325, jun. 1980. Citado na página 41.
- Lago, P. J. A. et al. Espectroscopia da galáxia anelada peculiar fm 529-9. UEFS - Departamento de Física e Observatório Astronômico Antares e MCT/Laboratório Nacional de Astrofísica, XXVI Encontro de Físicos do Norte e Nordeste / ID: 159-1 1, 2016. Citado na página 20.
- Lambert, J. *Cosmologisches briefe*. Alemanha, 1761. Citado na página 12.

- Leavitt, H. S. 1777 variables in the magellanic clouds. *Annals of Harvard College Observatory*, v. 60, p. 87–108.3, jan. 1908. Citado na página 12.
- Lynds, R.; Toomre, A. On the interpretation of ring galaxies: the binary ring system II Hz 4. v. 209, p. 382–388, out. 1976. Citado na página 24.
- Ma, L.; Wu, X. Formation of collisional ring galaxies in Milgromian dynamics. v. 528, n. 1, p. 620–633, fev. 2024. Citado na página 25.
- Madore, B. F.; Nelson, E.; Petrillo, K. Atlas and catalog of collisional ring galaxies. v. 181, n. 2, p. 572–604, abr. 2009. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- Madore, B. F.; Nelson, E.; Petrillo, K. Atlas and Catalog of Collisional Ring Galaxies. v. 181, n. 2, p. 572–604, abr. 2009. Citado na página 44.
- Mayya, Y. D. et al. Star formation history of the post-collisional Cartwheel galaxy using AstroSat/UVIT FUV images. v. 527, n. 2, p. 2816–2830, jan. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 29.
- Mendes de Oliveira, C. et al. The Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS): improved SEDs, morphologies, and redshifts with 12 optical filters. v. 489, n. 1, p. 241–267, out. 2019. Citado 3 vezes nas páginas 37, 38 e 39.
- Milone, A. C. et al. Introdução à astronomia e astrofísica. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*, São José dos Campos, INPE-7177-PUD/38, 2018. Citado na página 13.
- Moiseev, A. V. et al. A new catalogue of polar-ring galaxies selected from the Sloan Digital Sky Survey. v. 418, n. 1, p. 244–257, nov. 2011. Citado na página 44.
- Myrrha, M. L. M. et al. BVRI- $H\alpha$ surface photometry of peculiar ring galaxies. I. <ASTROBJ>HRG 2302</ASTROBJ>. v. 351, p. 860–868, nov. 1999. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 25.
- Neto, G. B. L. Astronomia extragaláctica e cosmologia. *Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG); Universidade de São Paulo (USP)*, Brasil, 2022. Citado 8 vezes nas páginas 12, 14, 16, 17, 18, 19, 20 e 32.
- Petrosian, V. Surface Brightness and Evolution of Galaxies. v. 210, p. L53, dez. 1976. Citado na página 42.
- Pizzolato, F.; Wolter, A.; Trinchieri, G. Chandra observations of the ULX N10 in the Cartwheel galaxy. v. 406, n. 2, p. 1116–1124, ago. 2010. Citado na página 29.
- Prestwich, A. H. et al. Chandra Observations of the Collisional Ring Galaxy NGC 922. v. 747, n. 2, p. 150, 2012. Citado na página 28.
- Reshetnikov, V. P.; Faúndez-Abans, M.; de Oliveira-Abans, M. Nuclear spectra of polar-ring galaxies. v. 322, n. 4, p. 689–694, abr. 2001. Citado na página 29.
- Riffel, R. A. Introdução à astrofísica. *Universidade Federal de Santa Maria*, Santa Maria, FSC1057, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- Ronconi, T. et al. GalaPy: A highly optimised C++/Python spectral modelling tool for galaxies. I. Library presentation and photometric fitting. v. 685, p. A161, maio 2024. Citado na página 35.

- Sackett, P. D.; Pogge, R. W. Another flattened dark halo: Polar ring galaxy A0136-0801. In: Holt, S. S.; Bennett, C. L. (Ed.). *Dark Matter*. [S.l.: s.n.], 1995. (American Institute of Physics Conference Series, v. 336), p. 141–144. Citado na página 23.
- Santos, L. F. S. Matéria bariônica. *Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Ciência de Fato*, 2018. Citado na página 14.
- Saraiva, M. d. F. O.; Filho, K. d. S. O.; Müller, A. M. Galáxias. Instituto de Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2023. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/~fatima/fis2010/Aula23-132.pdf>>. Acesso em: 28 set 2023. Citado 4 vezes nas páginas 17, 18, 19 e 20.
- Schweizer, F. et al. The Structure and Evolution of Hoag's Object. v. 320, p. 454, set. 1987. Citado na página 24.
- Schweizer, F.; Whitmore, B. C.; Rubin, V. C. Colliding and merging galaxies. II. SO galaxies with polar rings. v. 88, p. 909–925, jul. 1983. Citado na página 24.
- Slipher, V. M. Nebulae. *Proceedings of the American Philosophical Society*, v. 56, p. 403–409, jan. 1917. Citado na página 12.
- Smirnov, D. V.; Mosenkov, A. V.; Reshetnikov, V. P. Polar-ring galaxies in the Illustris TNG50 simulation. v. 527, n. 2, p. 4112–4128, jan. 2024. Citado na página 26.
- Soares, D. S. L. O fabuloso ccd: da astronomia para as populares câmeras digitais. *Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte*, 2007. Citado na página 31.
- Soares, D. S. L. Galáxias irregulares. *Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte*, 2009. Citado na página 17.
- Sundar Samantaray, A. et al. AstroSat observations of interacting galaxies NGC 7469 and IC 5283. p. arXiv:2404.12527, abr. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- Theys, J. C.; Spiegel, E. A. Ring galaxies. I. v. 208, p. 650–661, set. 1976. Citado 3 vezes nas páginas 21, 24 e 44.
- Toomre, A.; Toomre, J. Galactic Bridges and Tails. v. 178, p. 623–666, dez. 1972. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- Whitmore, B. C. et al. New Observations and a Photographic Atlas of Polar-Ring Galaxies. v. 100, p. 1489, nov. 1990. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.
- Wright, T. An original theory or new hypothesis of the universe. Londres, 1750. Citado na página 12.
- Wuensche, C. A. Galáxias. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, INPE-7177-PUD/38*, 2003. Citado na página 19.

APÊNDICE A – Lista da amostra

Tabela 3 – Lista de galáxias aneladas peculiares encontradas no S-PLUS. As coordenadas RA estão em unidades de horas/minutos/segundos e DEC em unidades de graus/minutos/segundos.

Objeto	RA	DEC	Fotometria confiável
A 0336-4905	03 37 57.6	-48 55 40	Sim
A 0351-5458	03 52 49.3	-54 49 50	Não
A 0414-4756	04 16 18.68	-47 49 10.81	Sim
A 1256-1710	12 58 43.5	-17 26 49	Sim
A 2102-2345	21 05 40.14	-23 33 04.74	Não
A 2104-2536	21 07 24.40	-25 24 44.63	Não
AM 0034-351	00 37 04.6600	-34 56 24.400	Sim
AM 0035-335	00 37 41.1100	-33 42 58.800	Não
AM 0051-272	00 53 59.57	-27 08 33.35	Não
AM 0053-353	00 56 19.5500	-35 14 52.200	Sim
AM 0058-311	01 00 44.6000	-30 55 49.100	Não
AM 0119-340	01 21 17.4100	-33 50 23.000	Sim
AM 0146-321	01 49 04.5800	-31 59 46.800	Sim
AM 0147-350	01 49 43.7000	-34 49 51.900	Sim
AM 0154-353	01 57 09.0000	-35 18 48.400	Não
AM 0157-311	01 59 39.5300	-31 01 13.100	Não
AM 0203-325	02 05 46.3400	-32 40 35.200	Sim
AM 0226-320	02 28 20.1100	-31 52 51.700	Sim
AM 0227-484	02 29 16.1100	-48 29 28.500	Sim
AM 0229-444	02 31 38.7900	-44 31 27.500	Sim
AM 0236-310	02 38 45.1500	-30 48 23.400	Sim
AM 0322-374	03 23 54.2112	-37 30 33.026	Não
AM 0329-715	03 29 43.6800	-71 45 25.400	Não
AM 0330-324	03 32 49.2900	-32 40 07.300	Não
AM 0332-305	03 34 16.8000	-30 43 57.100	Não
AM 0332-324	03 34 57.28	-32 38 25.03	Sim
AM 0343-383	03 45 02.0800	-38 22 56.600	Não
AM 0346-570	03 47 42.8400	-56 57 07.500	Sim

Objeto	RA	DEC	Fotometria confiável
AM 0352-360	03 54 28.4500	-35 58 01.700	Não
AM 0403-555	04 04 16.7000	-55 46 08.000	Não
AM 0412-525	04 13 50.63	-52 47 42.15	Sim
AM 0413-590	04 14 27.0845	-58 57 56.571	Não
AM 0414-491	04 16 08.1137	-49 11 20.203	Sim
AM 0415-475	04 16 30.0600	-47 50 55.600	Sim
AM 0417-391	04 19 39.3653	-39 10 24.025	Não
AM 0420-440	04 22 12.8400	-43 58 17.600	Sim
AM 0422-473	04 24 21.0100	-47 31 35.500	Sim
AM 0426-484	04 28 02.2000	-48 43 02.000	Sim
AM 0432-625	04 32 33.7200	-62 51 48.000	Não
AM 0433-393	04 35 29.1200	-39 30 57.500	Sim
AM 0437-314	04 39 40.3465	-31 42 39.460	Sim
AM 0437-644	04 37 55.0900	-64 38 59.300	Não
AM 0438-503	04 39 22.2000	-50 31 47.000	Não
AM 0438-530	04 38 38.34	-53 03 20.49	Não
AM 0438-661	04 38 39.5400	-66 13 57.400	Sim
AM 0439-373	04 40 59.5600	-37 34 10.600	Não
AM 0445-525	04 46 12.2700	-52 54 48.700	Sim
AM 0445-635	04 45 39.7773	-63 47 52.499	Sim
AM 0455-465	04 57 01.7004	-46 45 02.988	Não
AM 1003-215	10 05 43.4000	-22 05 49.000	Não
AM 1006-380	10 09 06.9977	-38 24 04.149	Sim
AM 1011-284	10 14 11.4600	-28 56 31.300	Sim
AM 1024-234	10 26 56.2900	-24 05 21.200	Sim
AM 1025-370	10 27 13.8000	-37 25 17.000	Sim
AM 1045-245	10 48 23.4600	-25 09 43.400	Sim
AM 1054-325	10 56 58.10	-33 09 56.50	Não
AM 1110-251	11 12 58.0996	-25 35 14.235	Sim
AM 1303-235	13 06 24.0000	-24 09 50.600	Não
AM 1308-253	13 11 08.8800	-25 53 58.600	Sim
AM 2056-392	21 00 07.8447	-39 17 57.721	Não
AM 2102-252	21 05 43.8600	-25 14 16.200	Sim
AM 2104-241	21 07 08.8500	-24 02 39.900	Não
AM 2128-302	21 31 08.6686	-30 16 15.598	Não
AM 2130-294	21 33 29.6700	-29 30 23.300	Não
AM 2240-304	22 43 36.8400	-30 28 50.200	Sim

Objeto	RA	DEC	Fotometria confiável
AM 2246-581	22 49 19.0121	-57 56 12.839	Não
AM 2334-292	23 37 06.5600	-29 05 01.700	Sim
AM 2338-312	23 41 22.0000	-31 03 12.000	Sim
ARP 118	02 55 12.1960	-00 11 00.806	Não
Abell 1631-14	12 52 32.4	-15 52 28	Sim
Abell 1644-105	12 57 37.2	-17 11 19	Sim
ESO 201-IG26	04 15 17.63	-50 56 40.65	Não
ESO 202-G01	04 16 29.79	-47 50 55.61	Sim
ESO 464-G31	21 18 21.53	-27 20 46.84	Não
ESO 501-IG46	10 37 12.70	-27 41 00.54	Não
FM 251-33	04 44 08.04	-44 06 46.84	Sim
FM 358-11	03 35 20.22	-32 36 06.95	Sim
FM 412-16	01 16 05.79	-32 29 28.12	Sim
HRG 03101	04 00 06.8900	-73 42 26.300	Sim
HRG 05201	01 53 29.57	-72 33 37.33	Sim
HRG 11701	03 57 51.74	-59 31 35.42	Não
HRG 11702	03 58 27.8900	-59 31 45.600	Não
HRG 11801	04 09 02.55	-59 06 30.66	Sim
HRG 15702	04 28 41.67	-54 43 01.05	Não
HRG 15703	04 35 11.89	-54 12 19.41	Não
HRG 15704	04 45 31.72	-54 34 23.67	Não
HRG 20201	04 16 09.63	-49 13 48.18	Não
HRG 20202	04 24 31.62	-49 34 28.39	Não
HRG 35201	01 15 00.60	-32 14 35.73	Não
HRG 36101	04 39 38.5898	-37 02 58.327	Sim
HRG 36102	04 44 07.14	-32 54 35.13	Não
HRG 37501	10 29 45.37	-38 20 54.92	Não
HRG 41101	00 51 51.66	-30 40 00.21	Não
HRG 41102	00 56 52.17	-31 57 46.07	Sim
HRG 53001	21 09 04.8800	-26 54 29.400	Não
HRG 56801	10 21 45.01	-18 24 37.66	Não
HRG 57201	11 43 13.66	-18 24 03.79	Não
HRG 57202	11 50 27.56	-18 34 47.38	Não
HRG 57203	11 54 54.86	-22 03 16.10	Sim
HRG 57204	11 59 44.4420	-20 58 15.748	Não
HRG 57205	12 00 31.13	-21 19 17.55	Não
HRG 57206	12 00 43.4100	-20 50 02.200	Sim

Objeto	RA	DEC	Fotometria confiável
NGC 5122	13 24 14.9	-10 39 15	Sim
NGC 7016	21 07 20.47	-25 29 14.11	Sim
OA 01103	22 48 28.02	-58 15 00.95	Sim
OA 02801	00 51 44.41	-30 37 27.60	Sim
OA 02802	00 57 00.58	-31 55 07.56	Sim
OA 03601	21 05 40.06	-25 13 54.92	Não
OA 03603	21 06 07.27	-25 20 55.70	Sim
SPRC 1	00 09 11.58	-00 36 54.7	Sim
SPRC 129	13 23 58.77	-01 45 52.7	Sim
SPRC 261	12 01 43.47	+00 10 59.2	Não
SPRC 265	13 20 22.67	-00 24 07.6	Não
SPRC 275	20 53 53.46	-00 58 05.4	Sim
SPRC 4	02 42 58.43	-00 57 09.2	Sim
SPRC 69	20 48 05.67	+00 04 07.8	Não
SPRC 73	00 32 09.80	+01 08 36.6	Sim

ANEXO A – Imagens da amostra

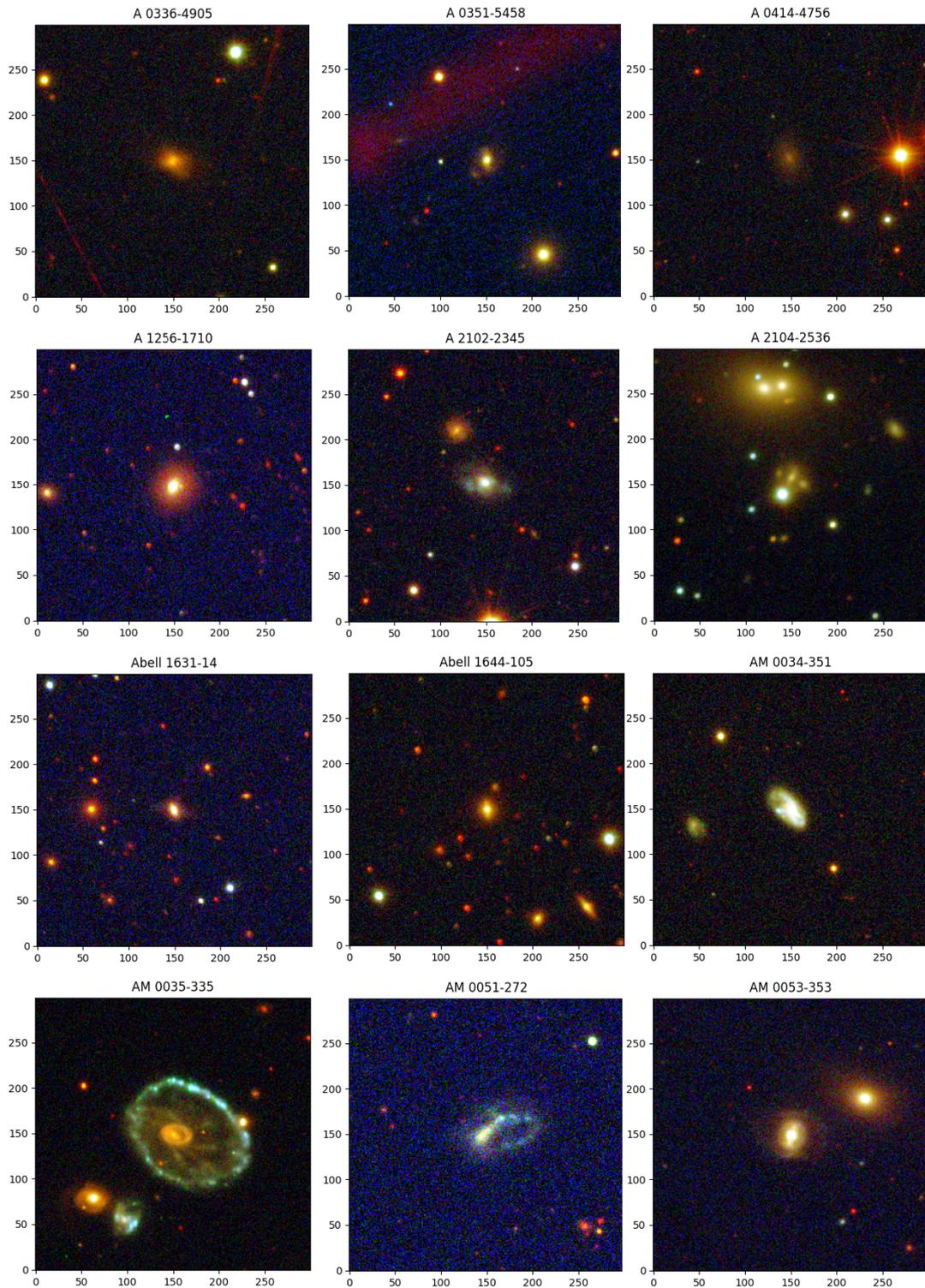


Figura 47

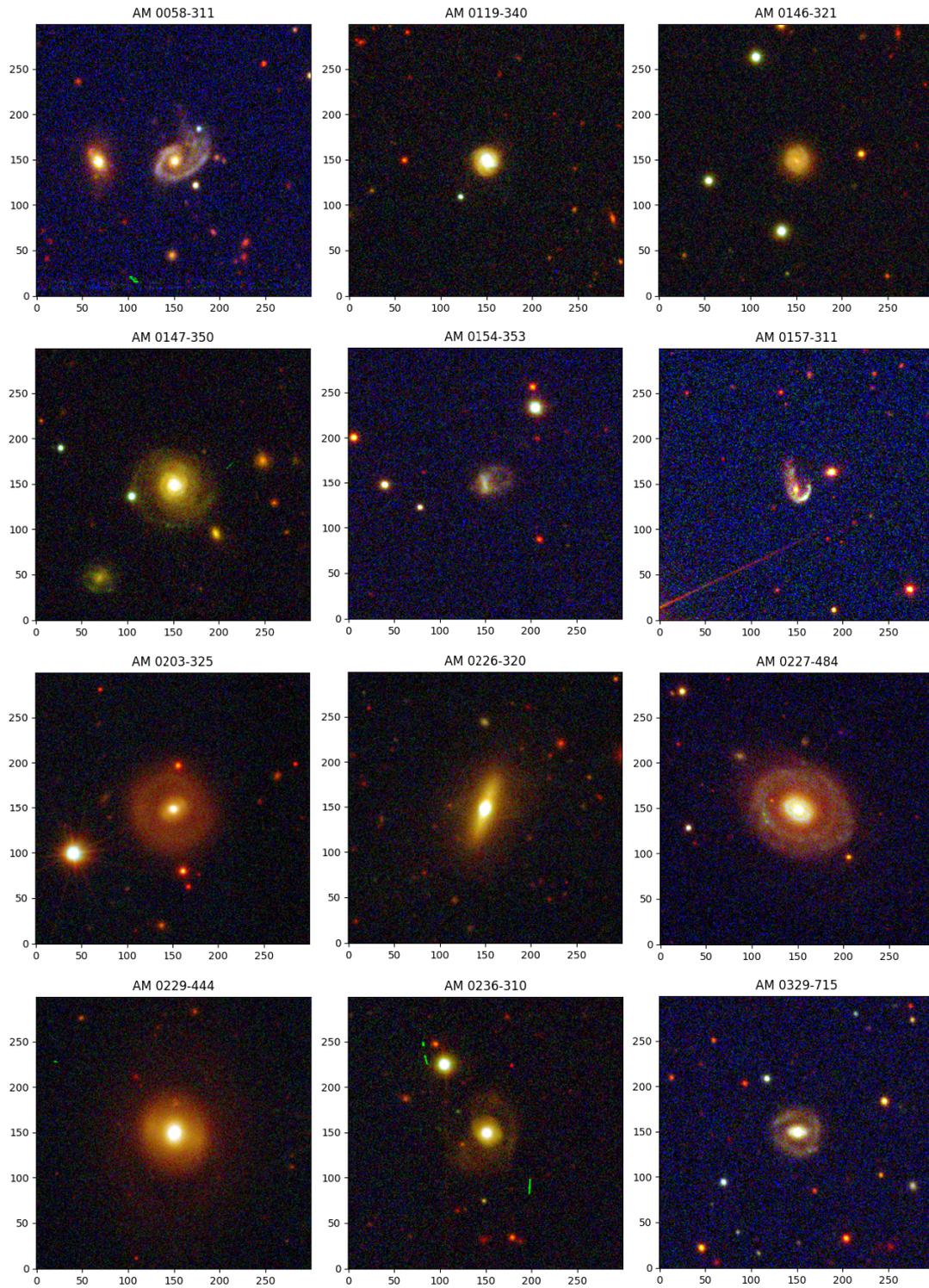


Figura 48

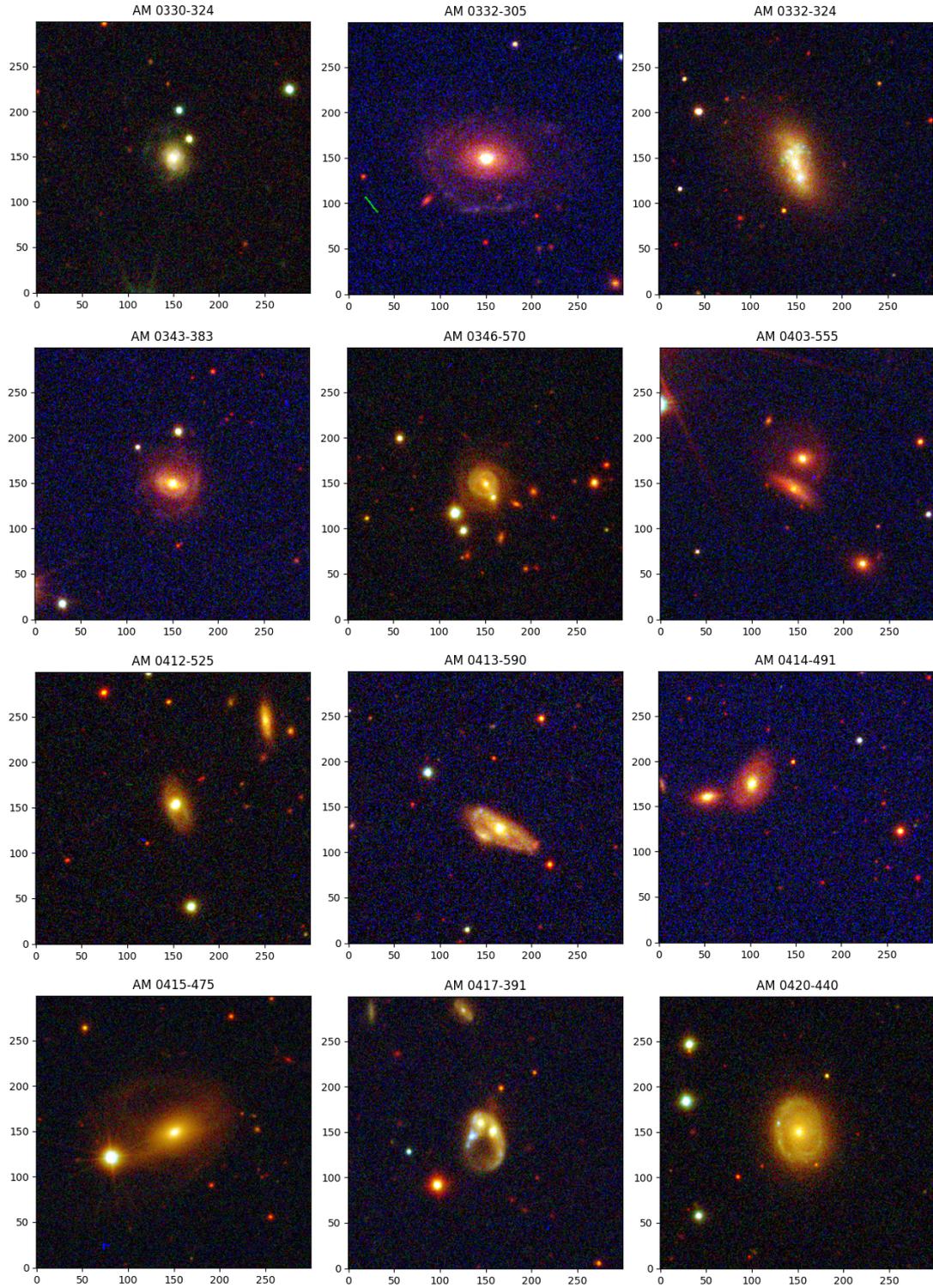


Figura 49

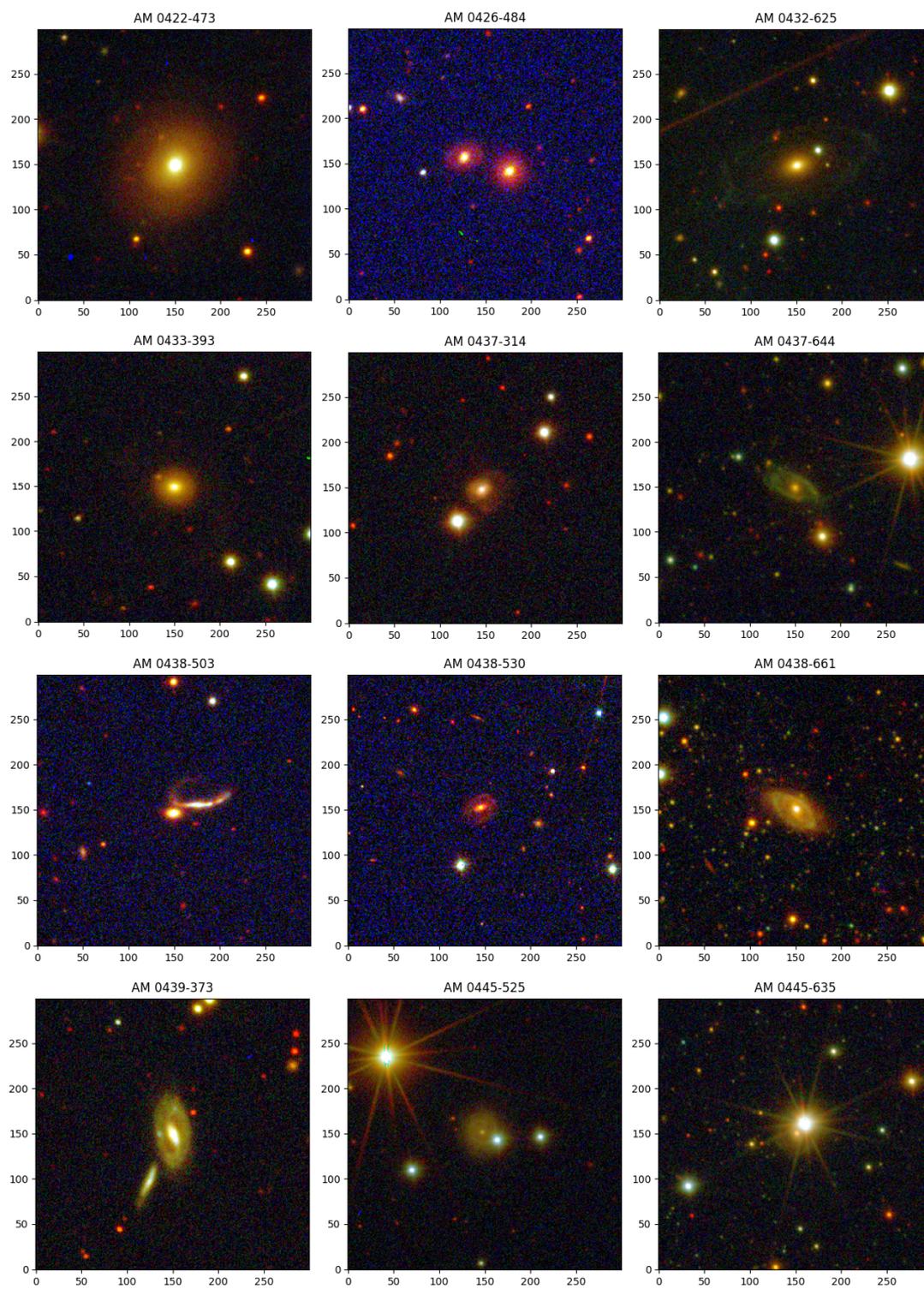


Figura 50

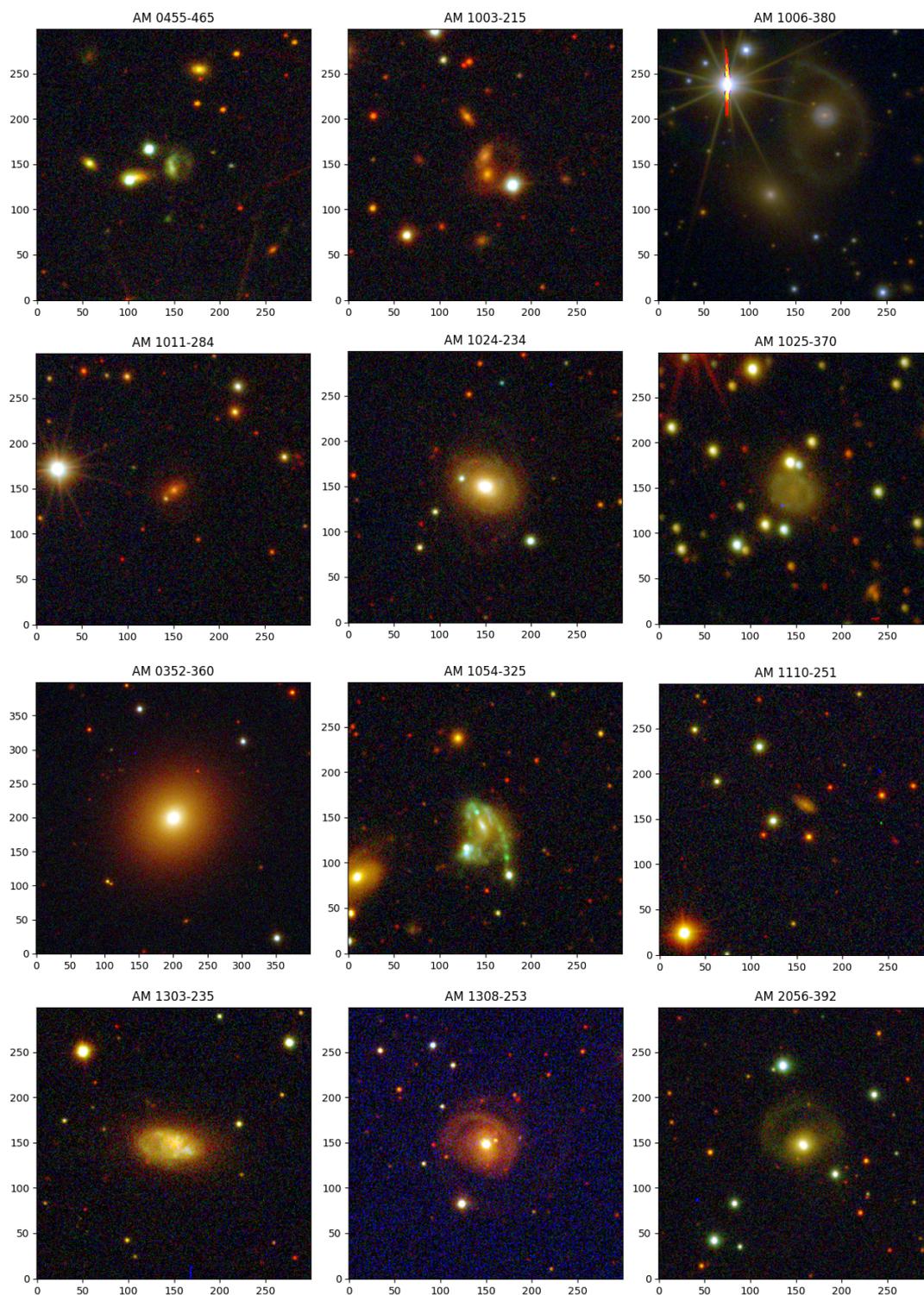


Figura 51

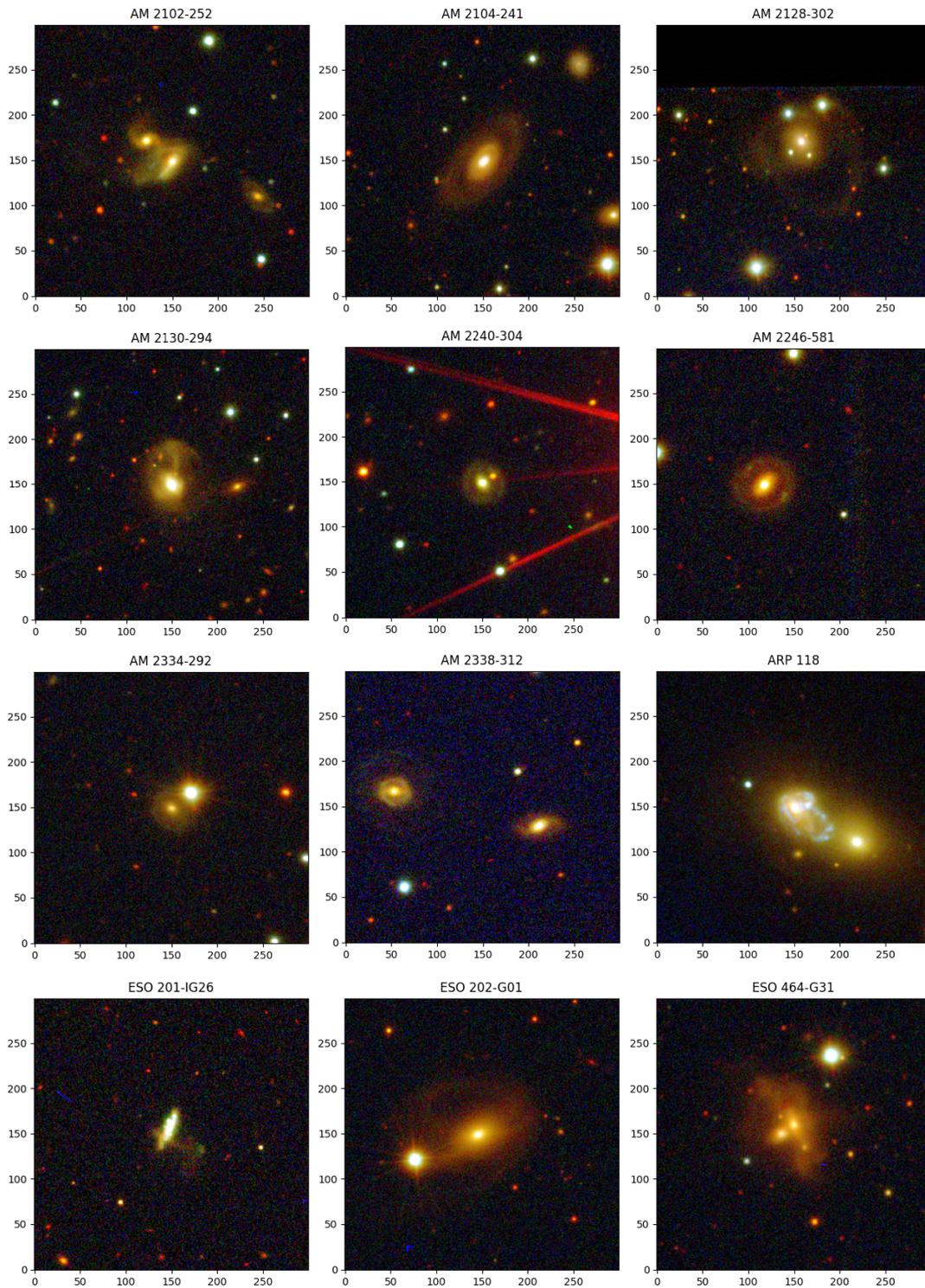


Figura 52

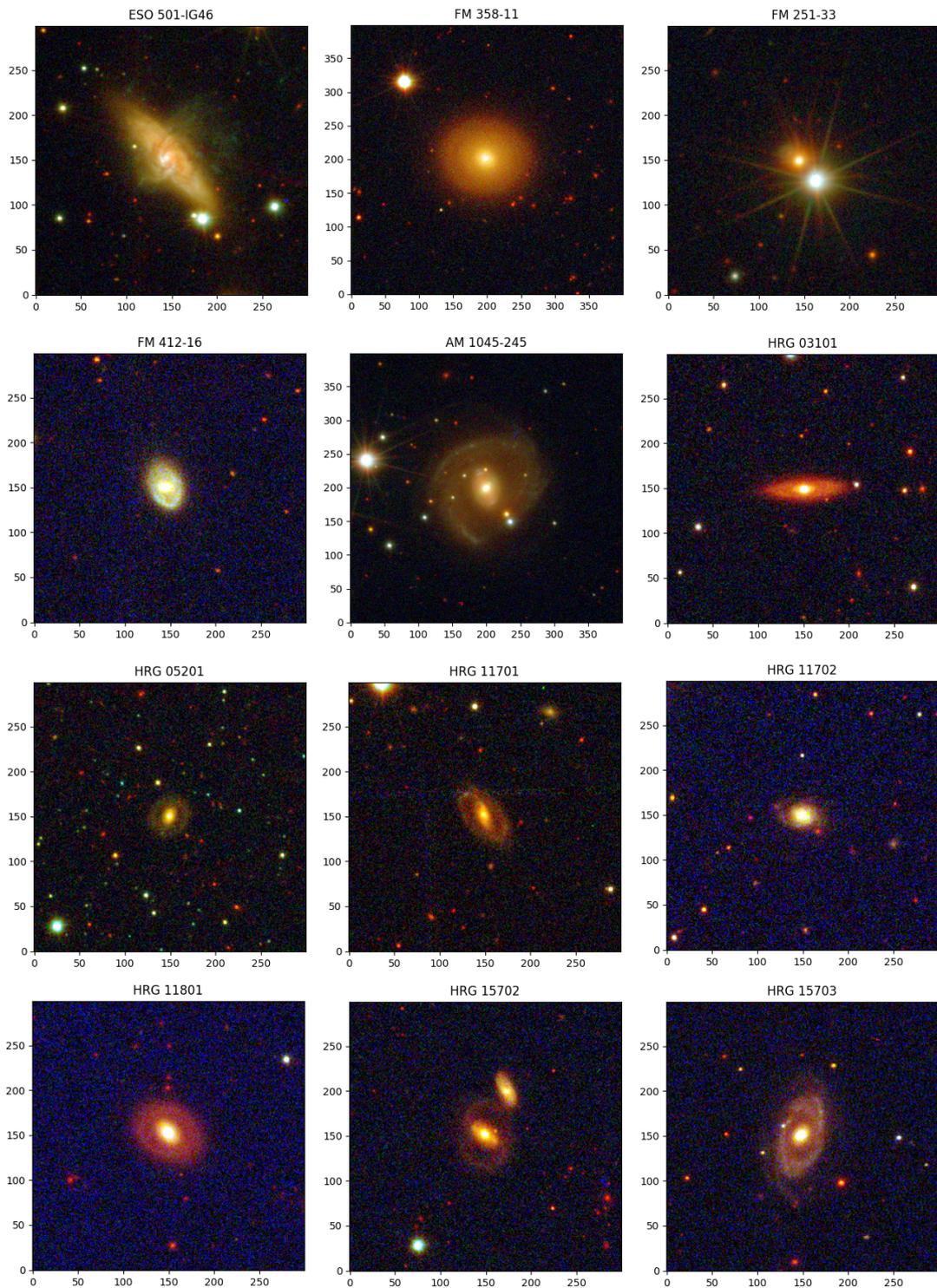


Figura 53

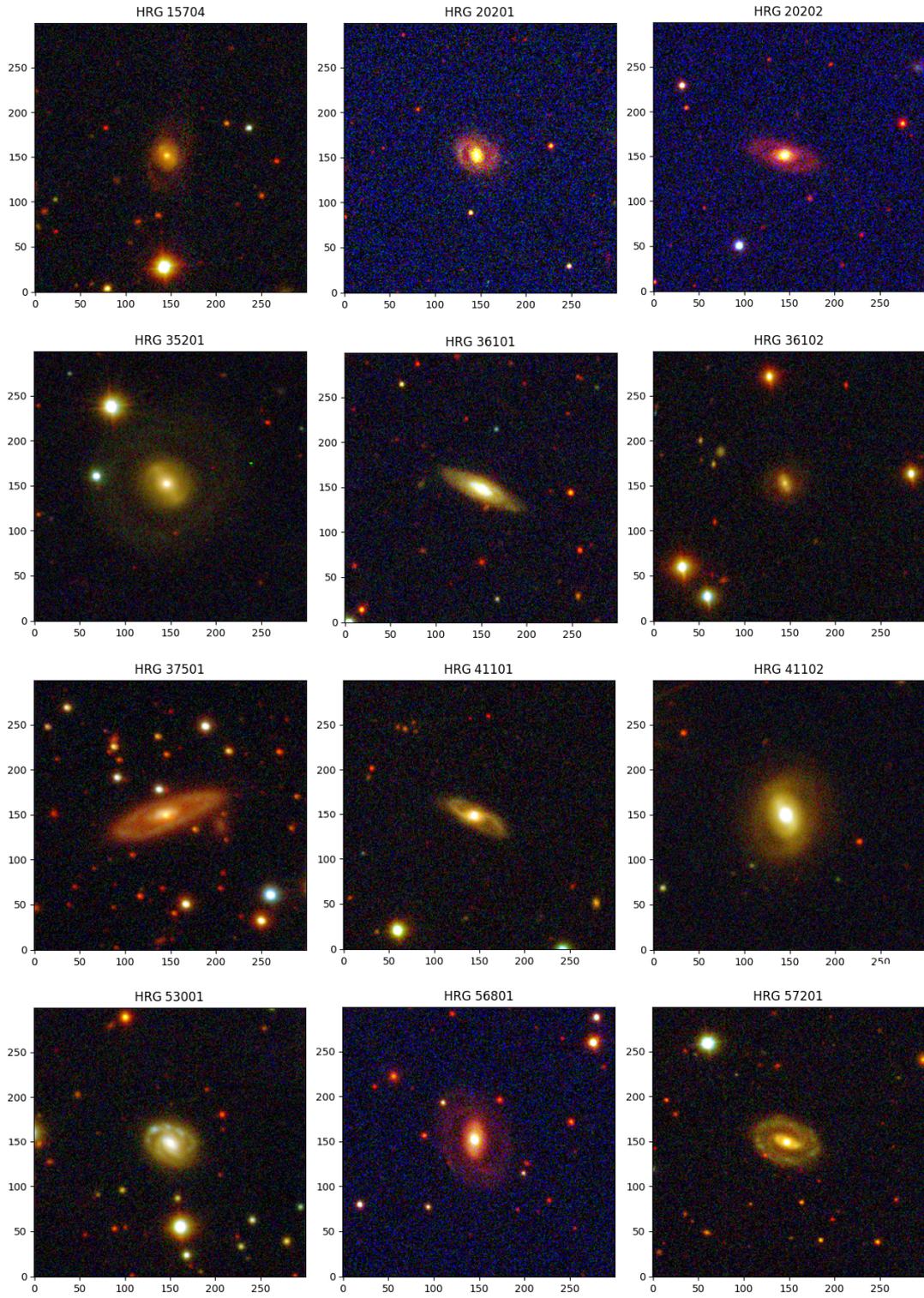


Figura 54

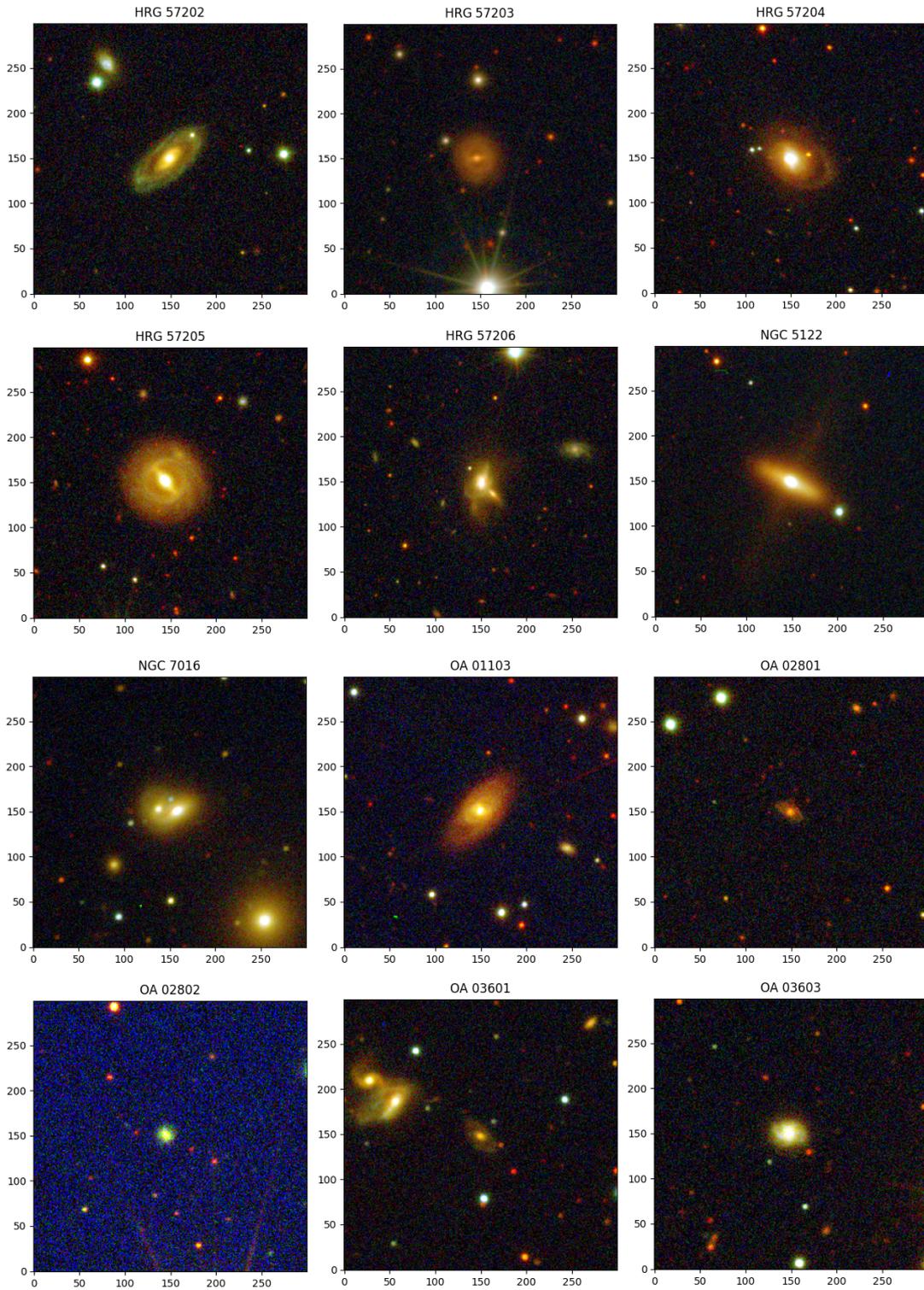


Figura 55

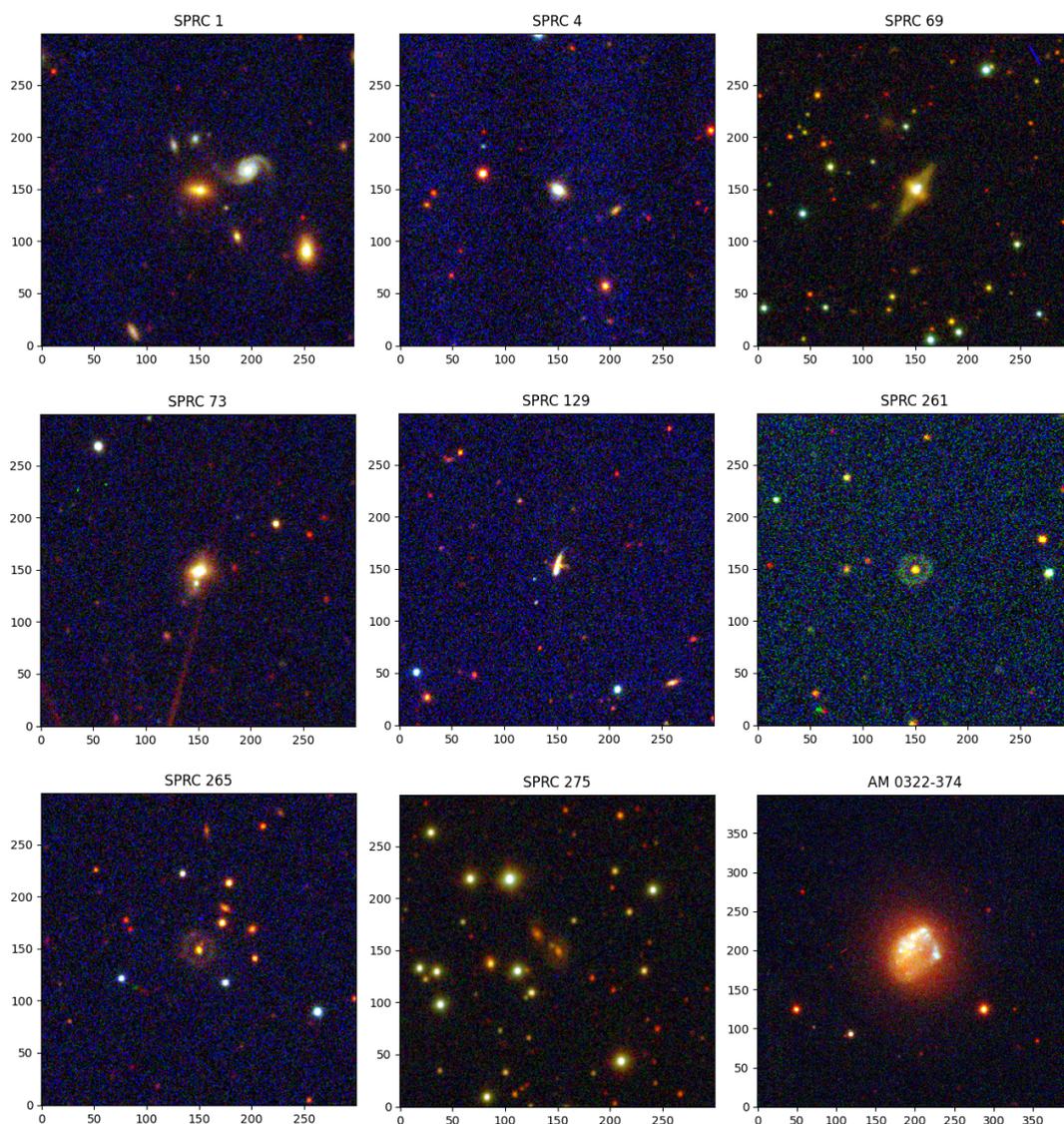


Figura 56

ANEXO B – Dados das aberturas

B.1 Comparação entre as aberturas

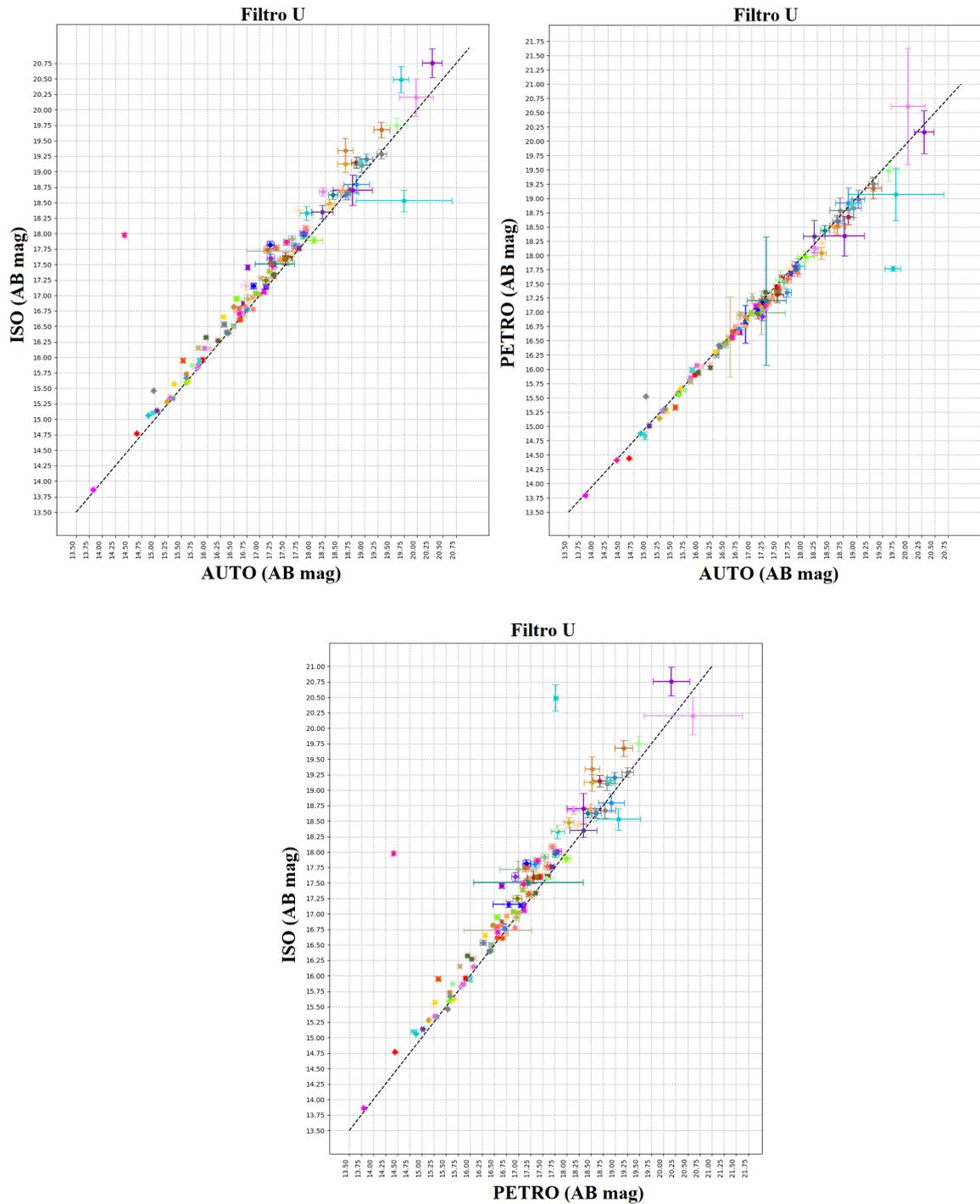


Figura 57

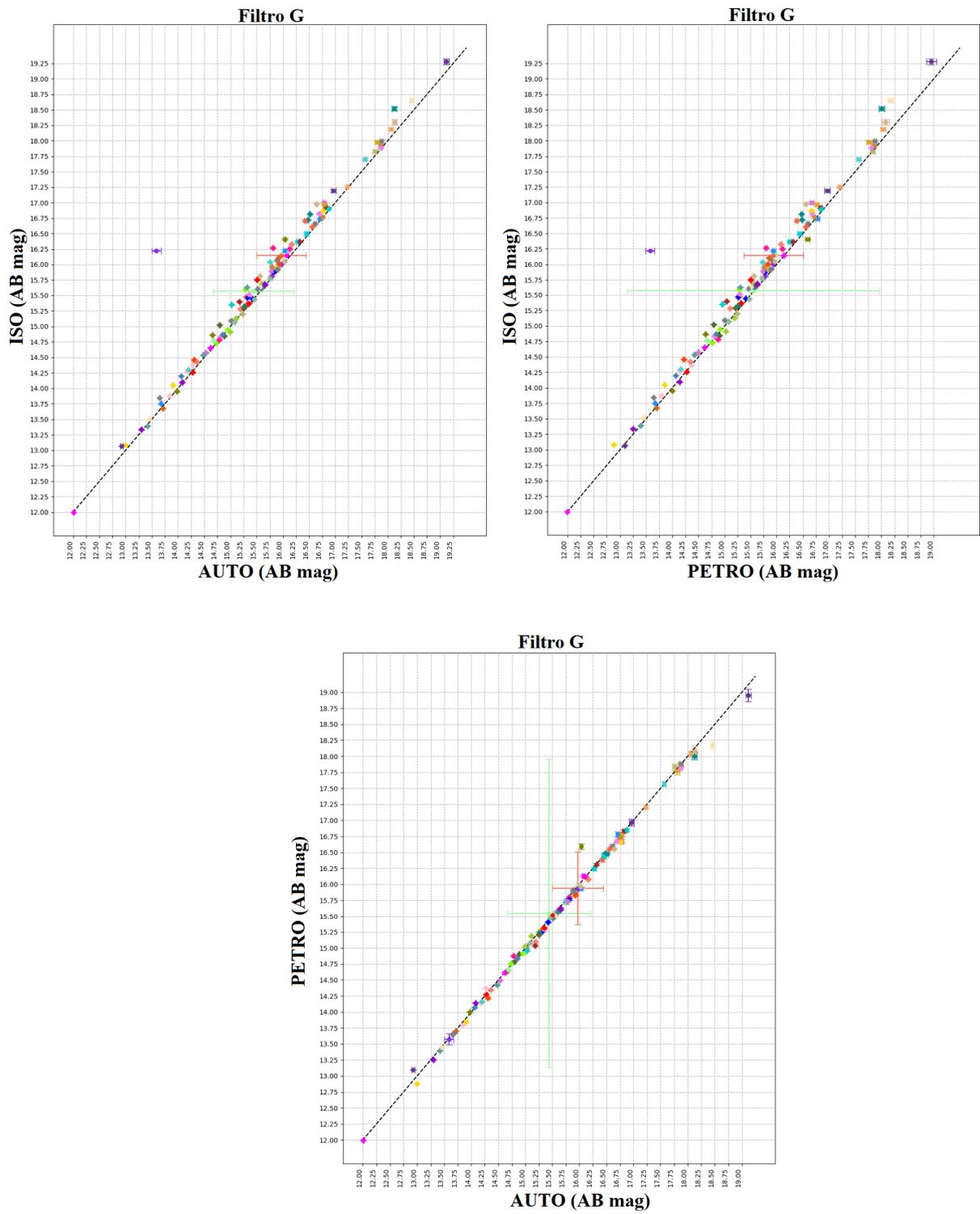


Figura 58

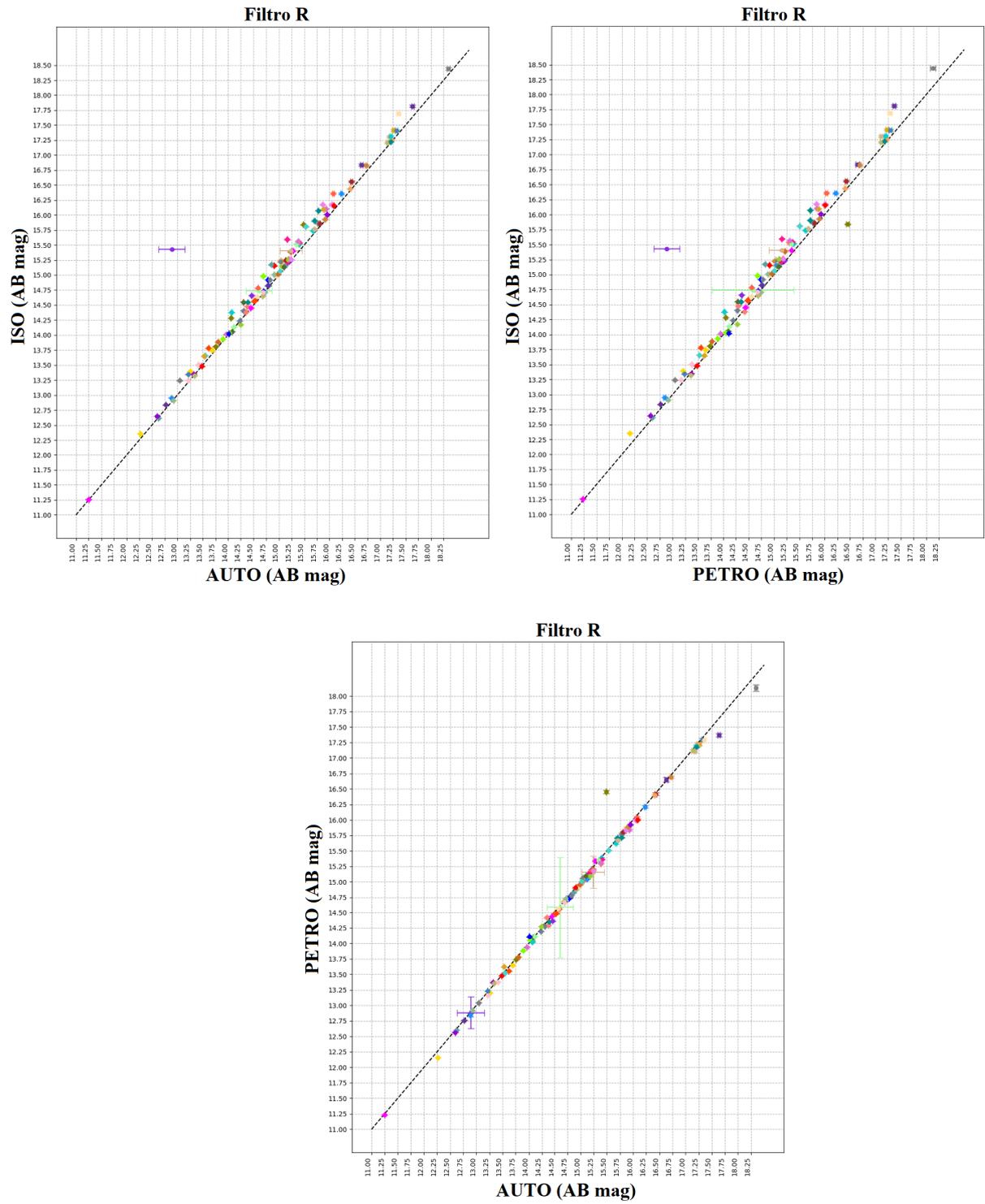


Figura 59

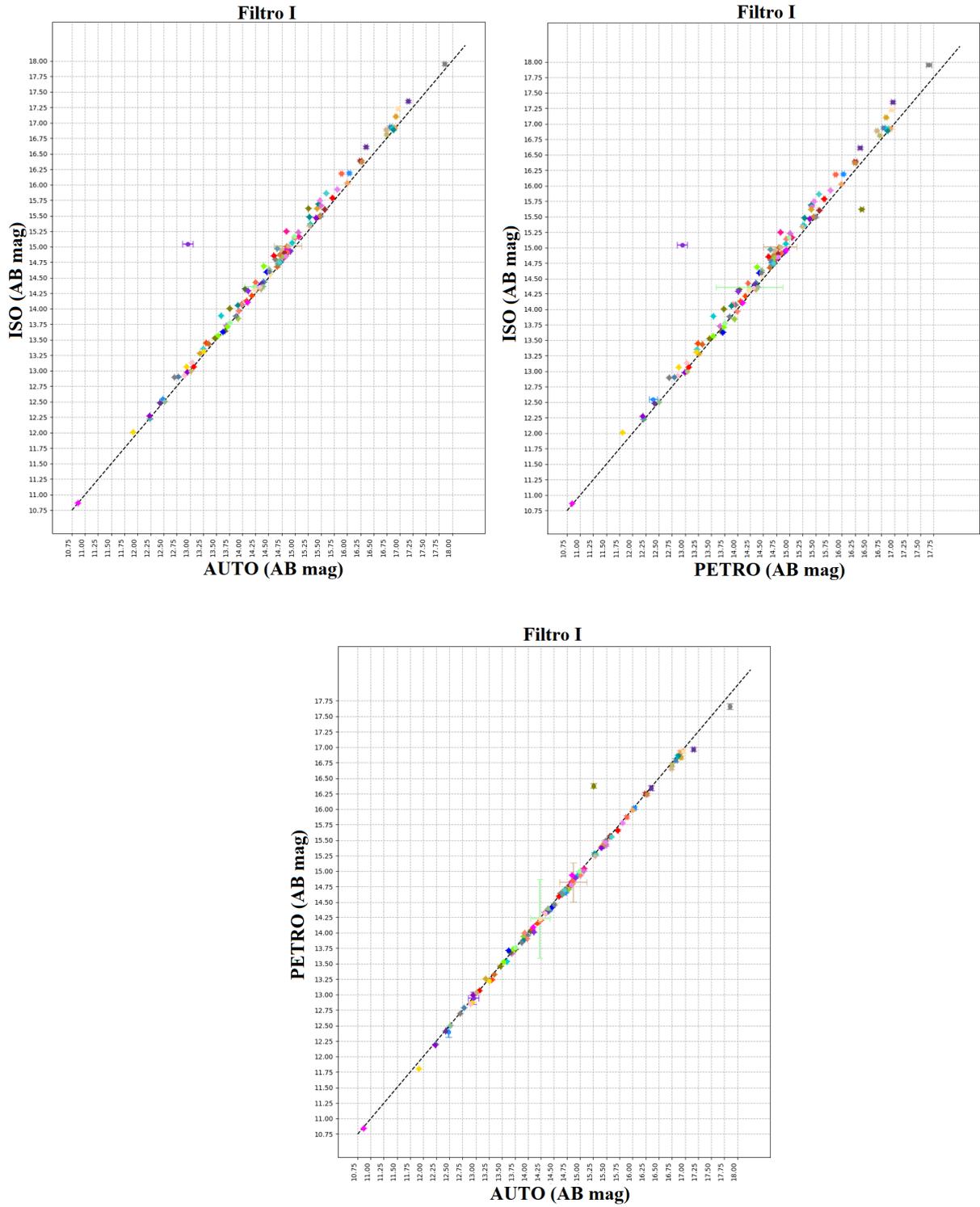


Figura 60

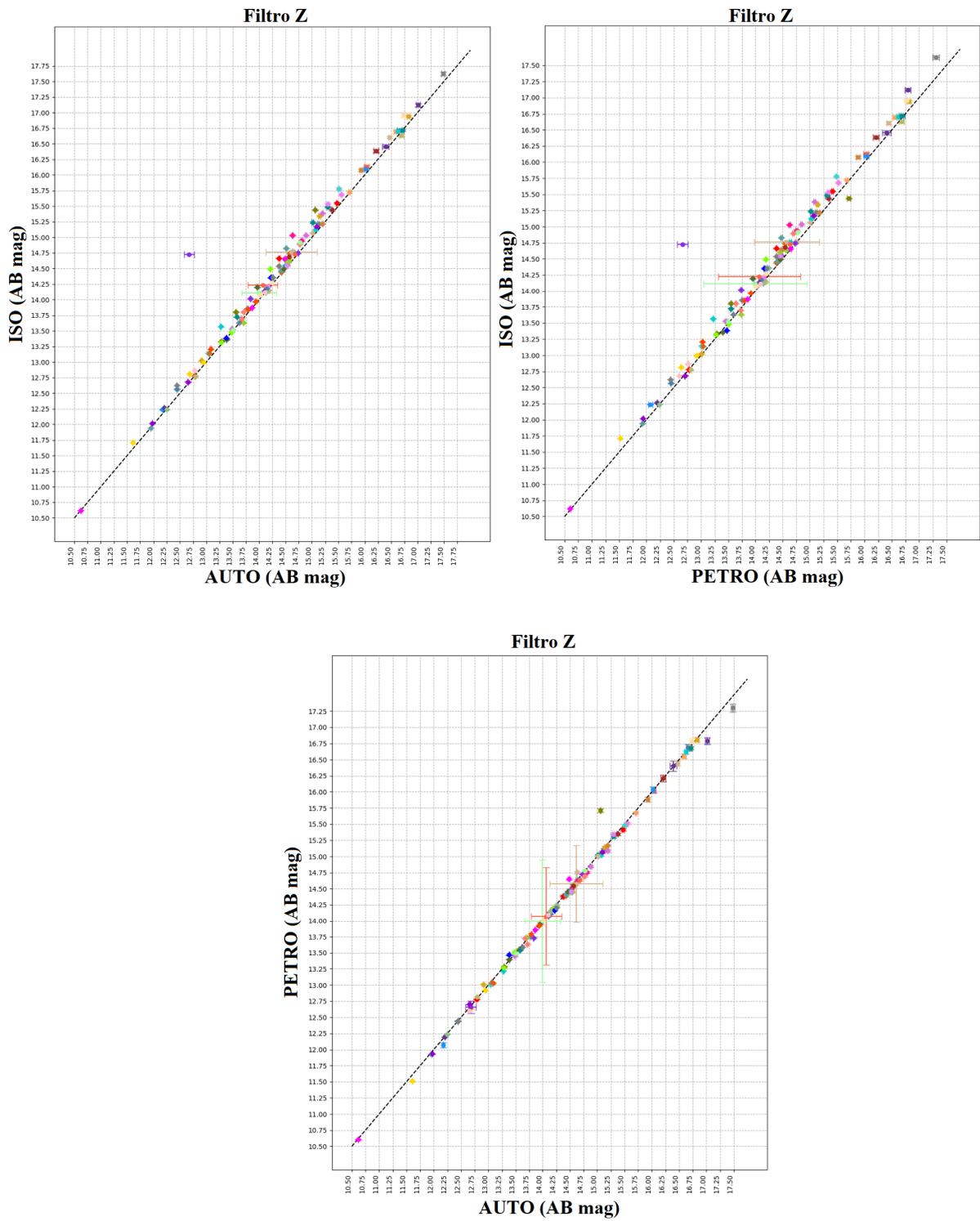


Figura 61

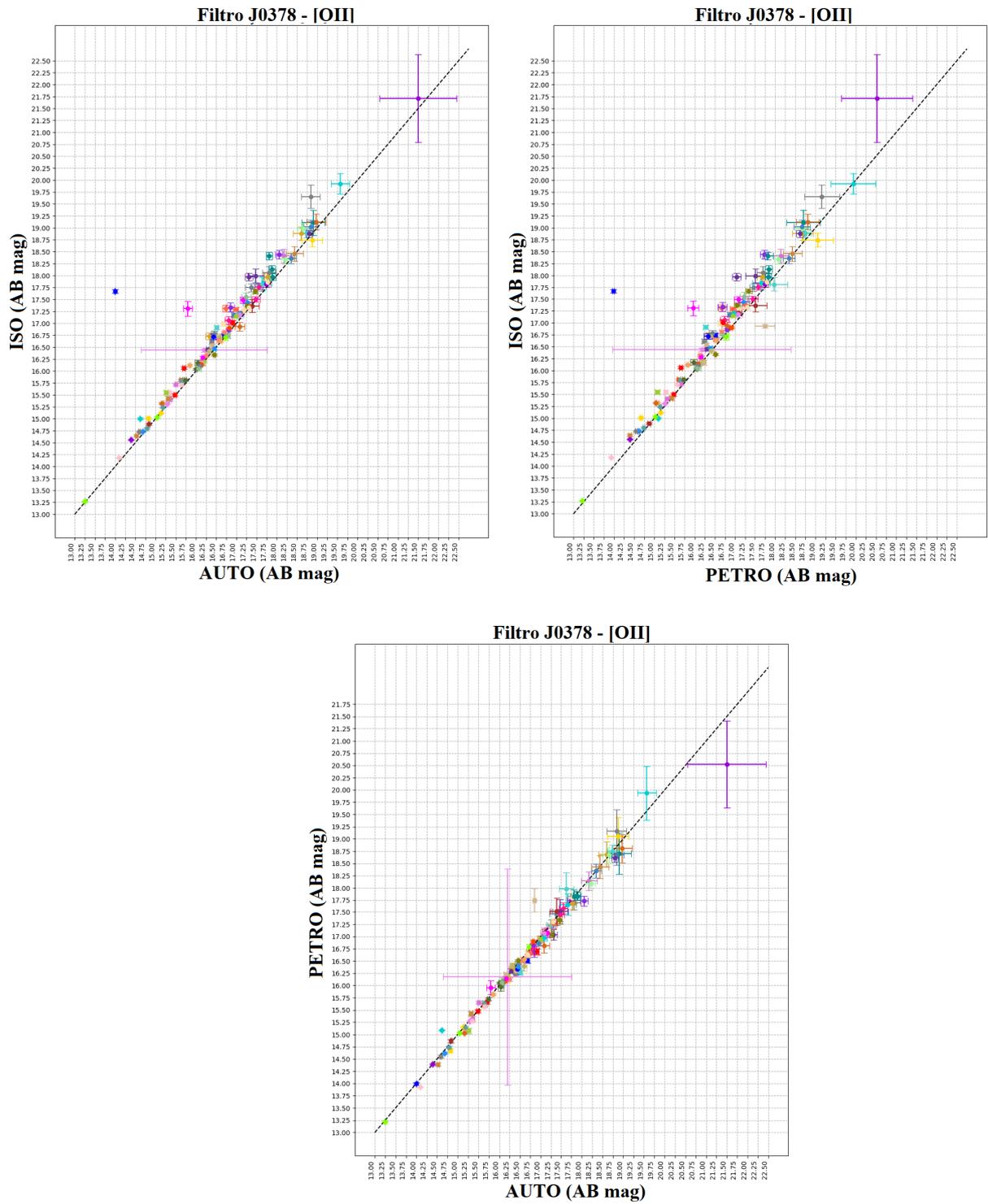


Figura 62

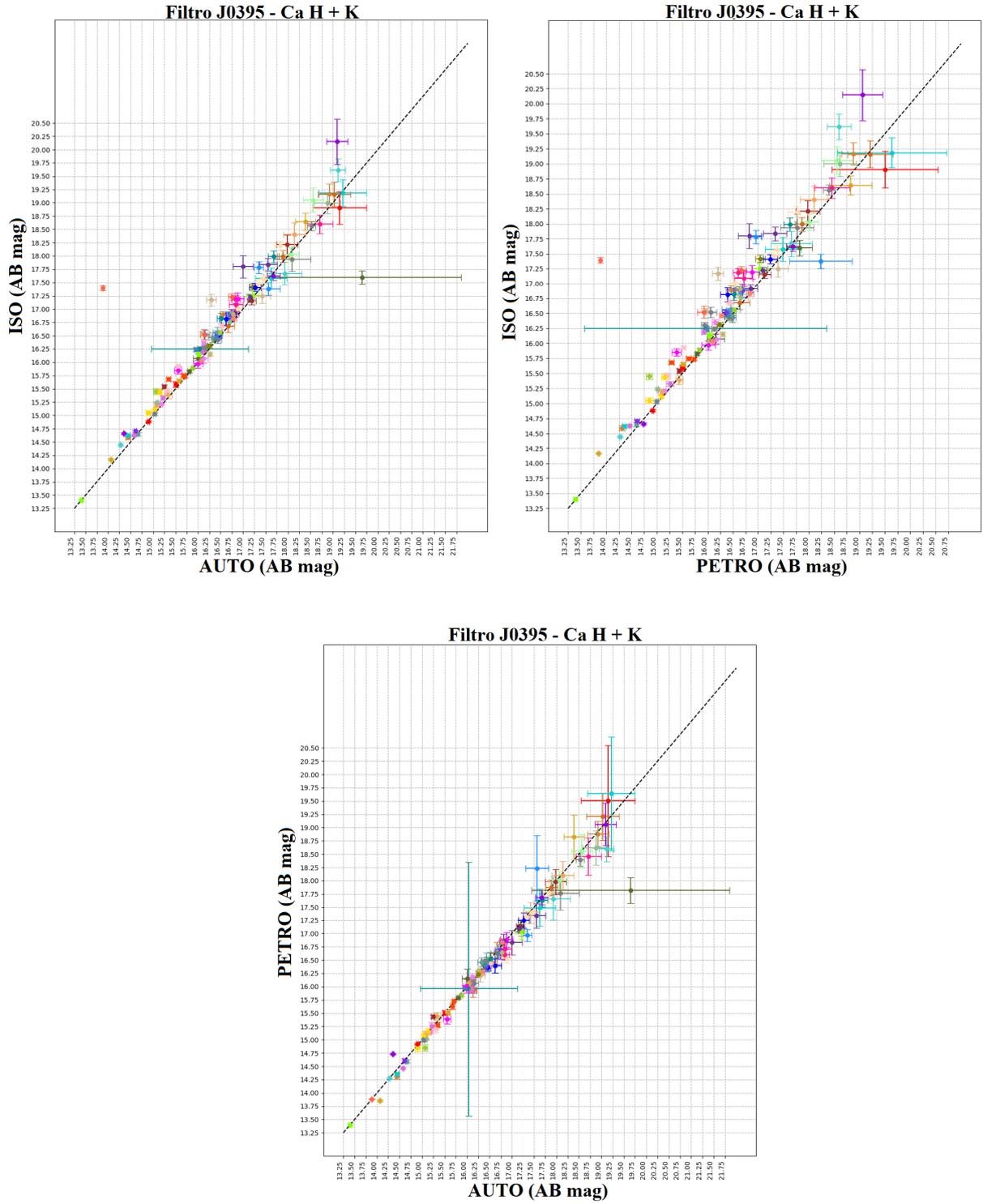


Figura 63

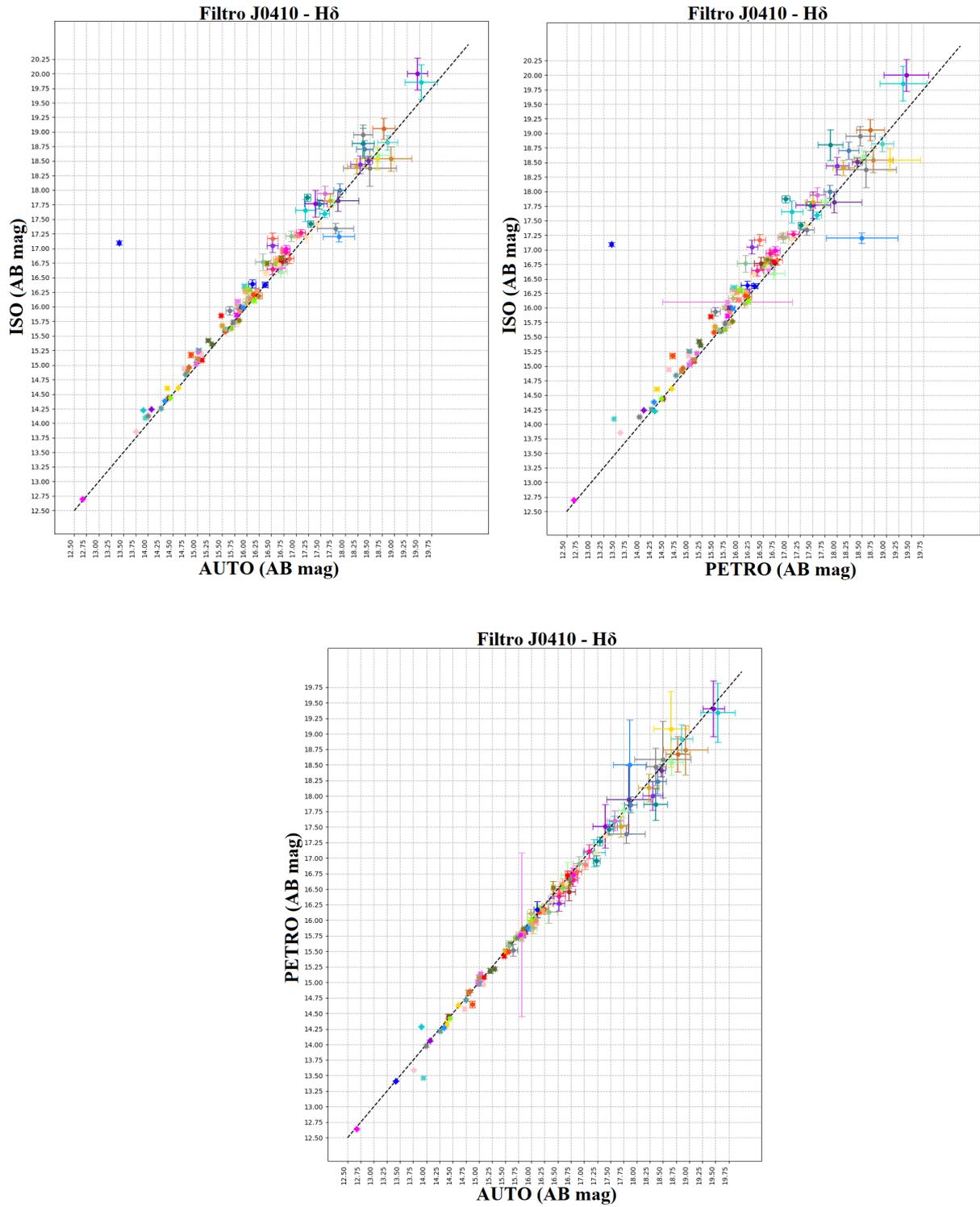


Figura 64

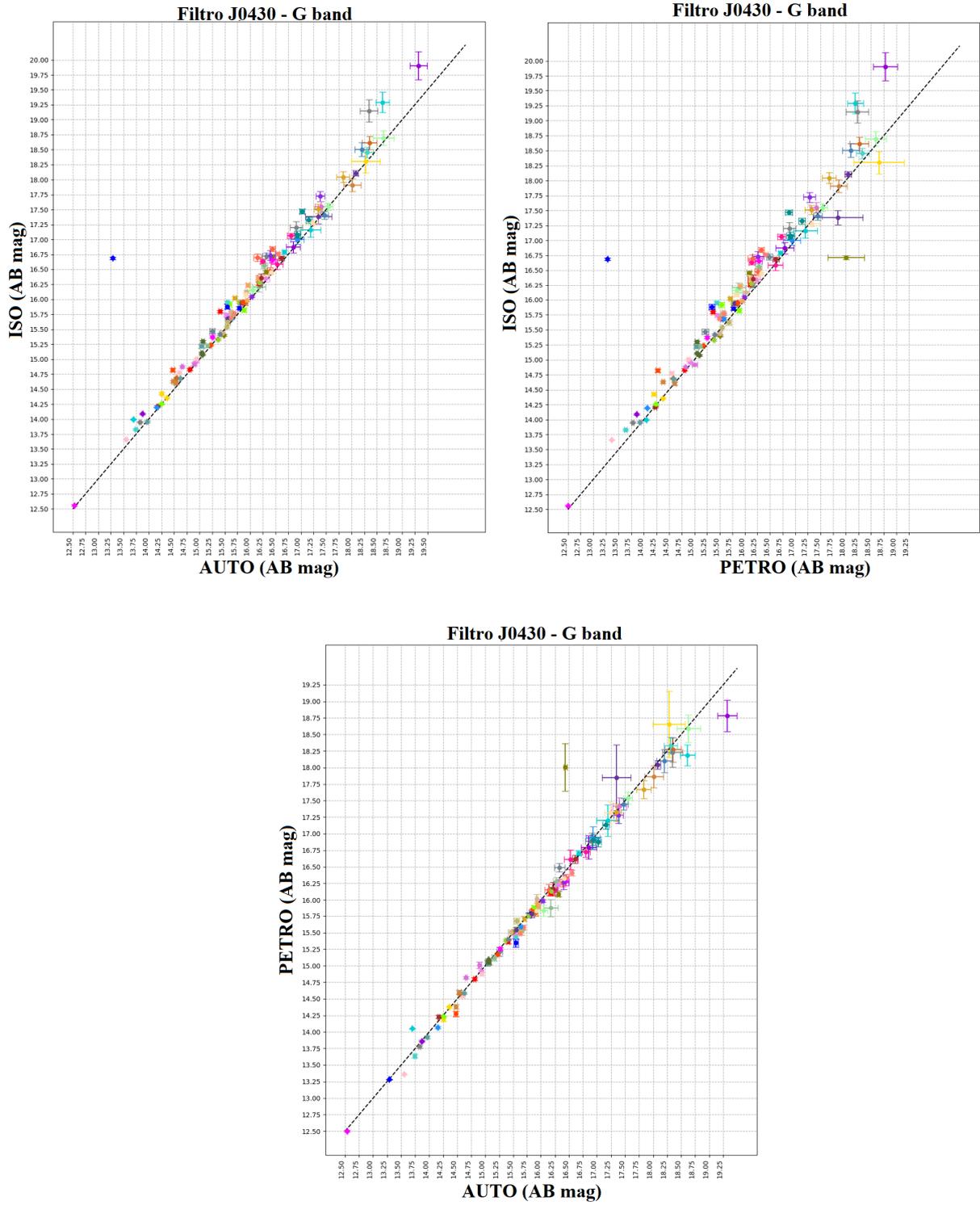


Figura 65

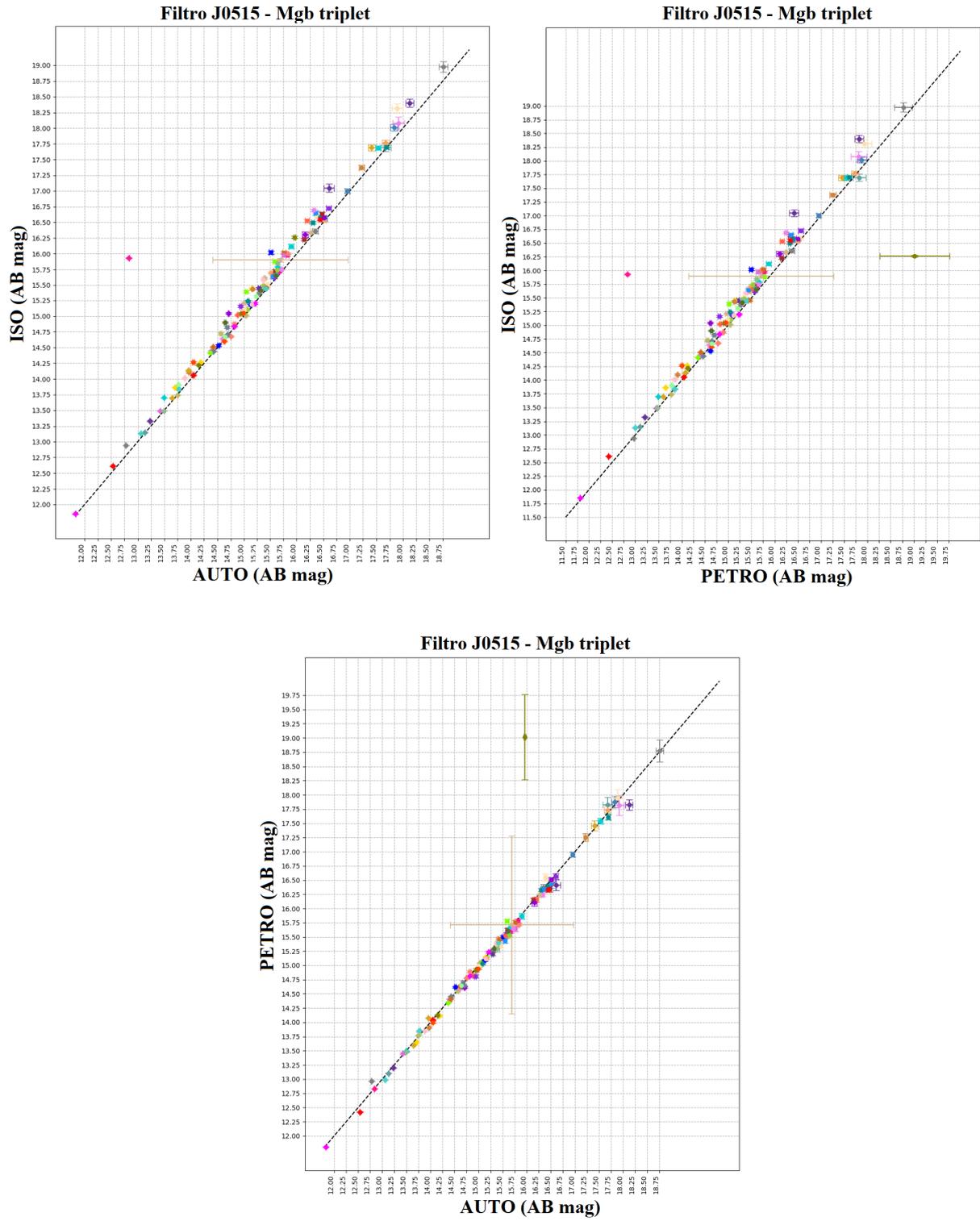


Figura 66

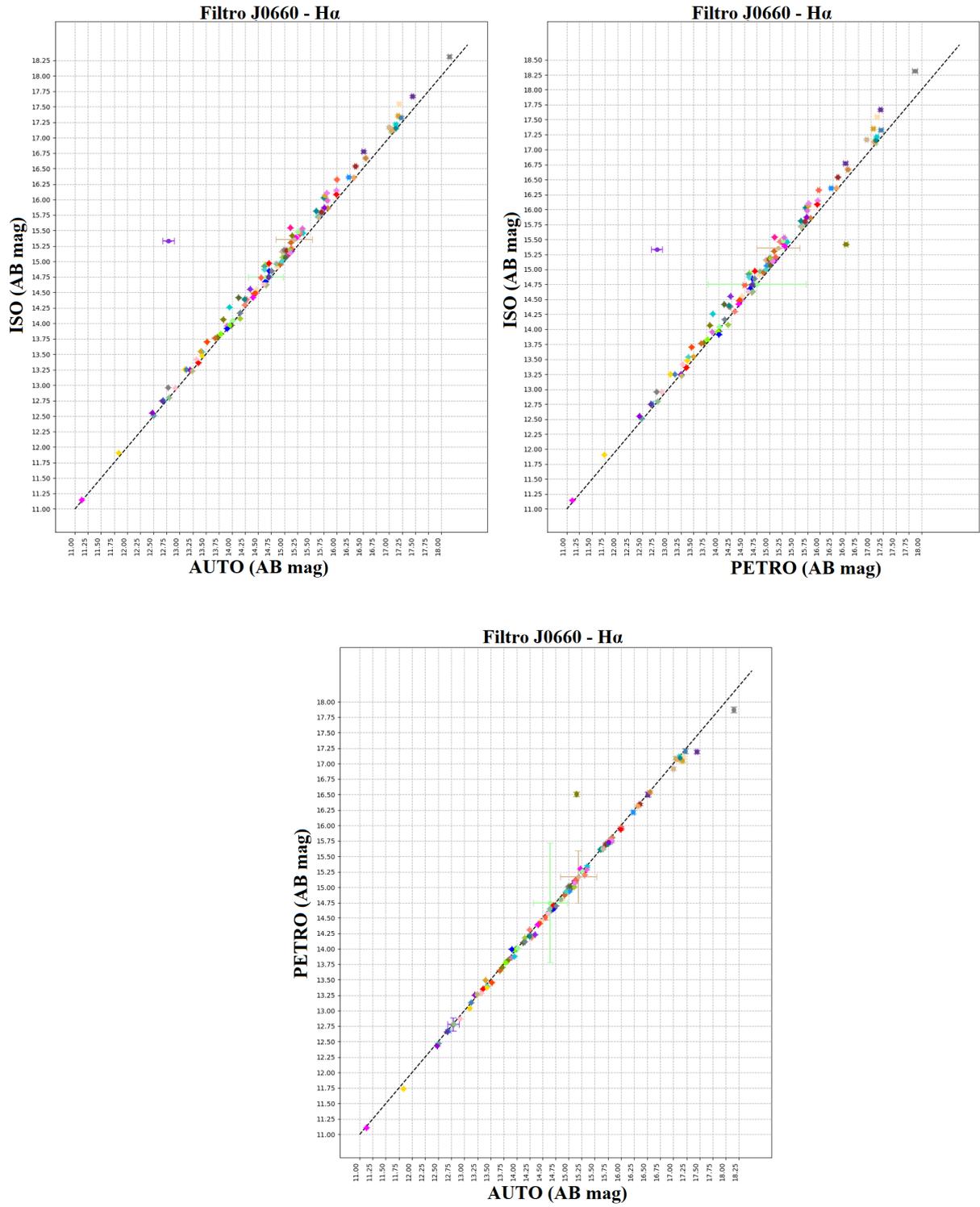


Figura 67

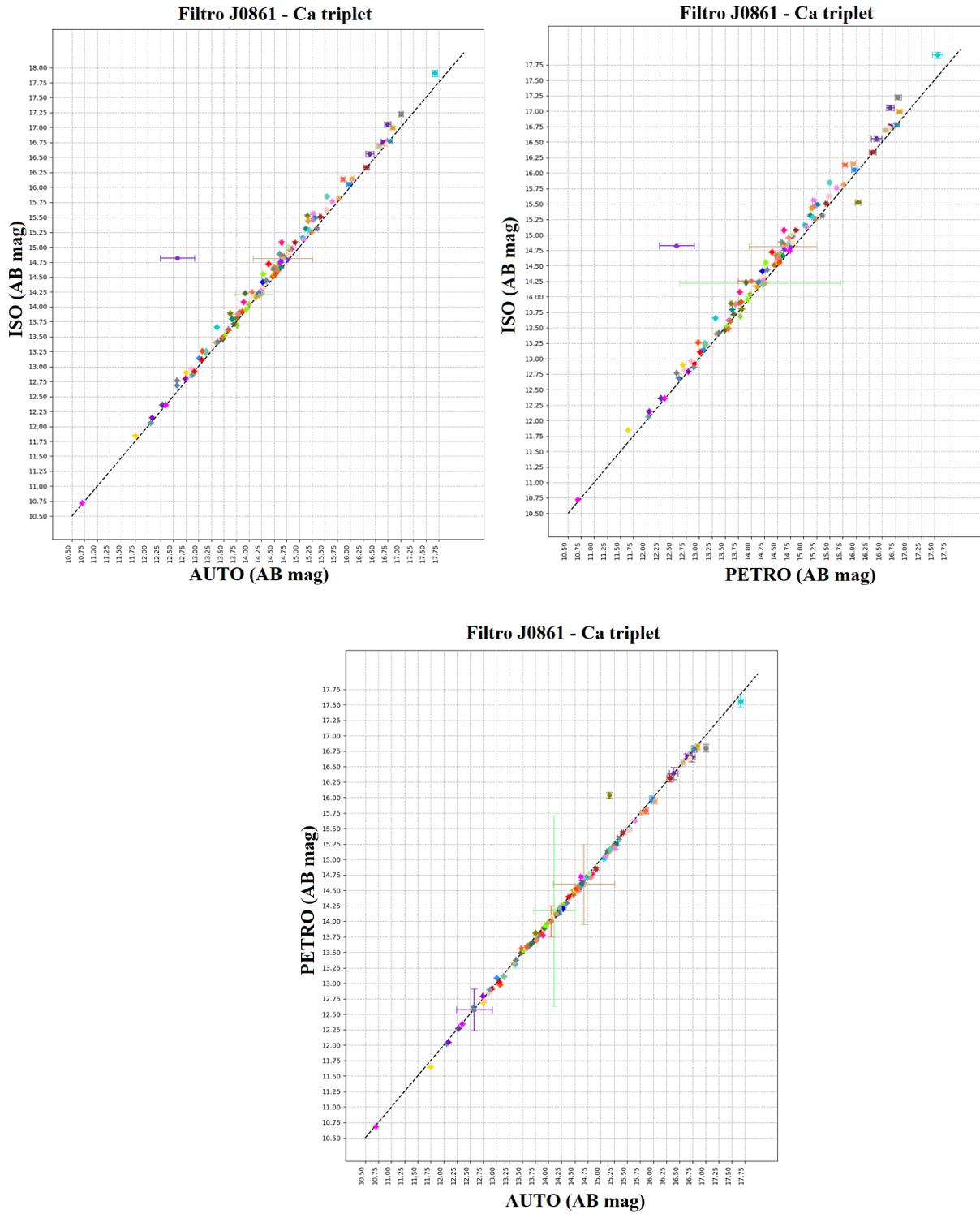


Figura 68

B.2 Amostra vista com os 12 filtros para as três aberturas

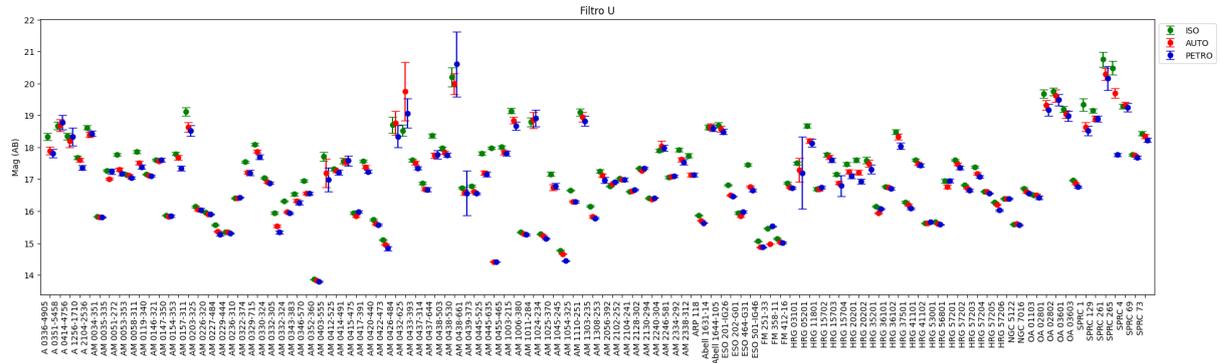


Figura 69

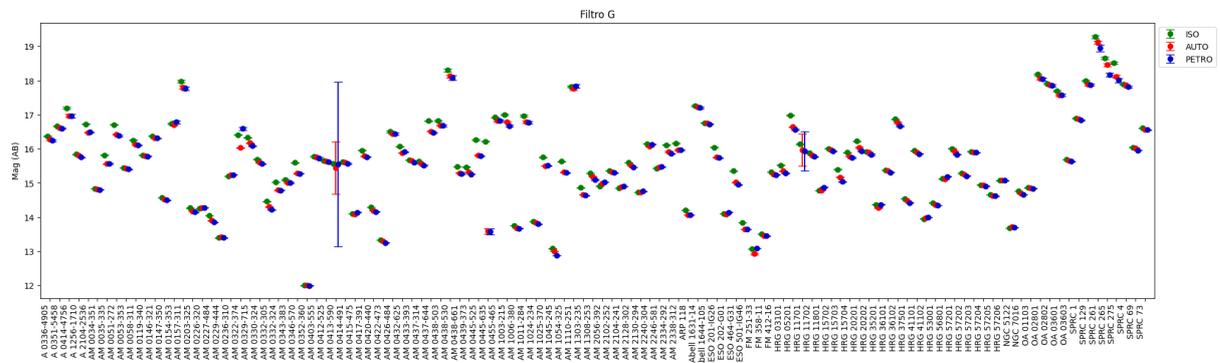


Figura 70

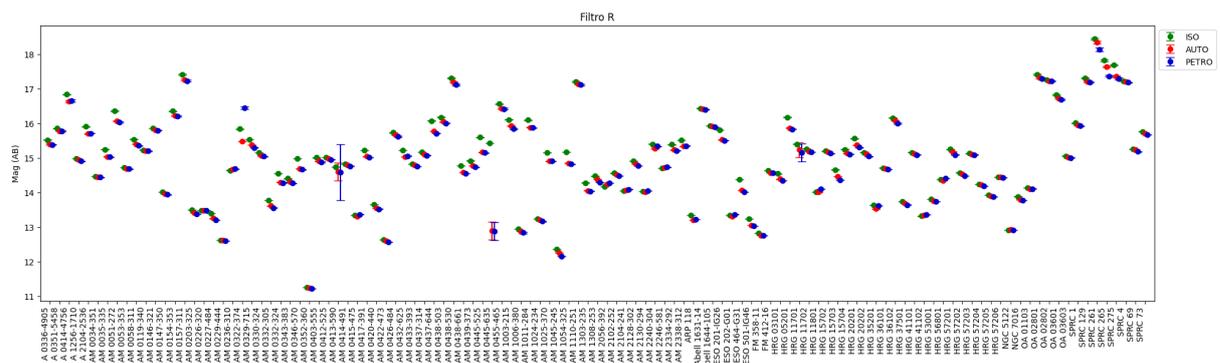


Figura 71

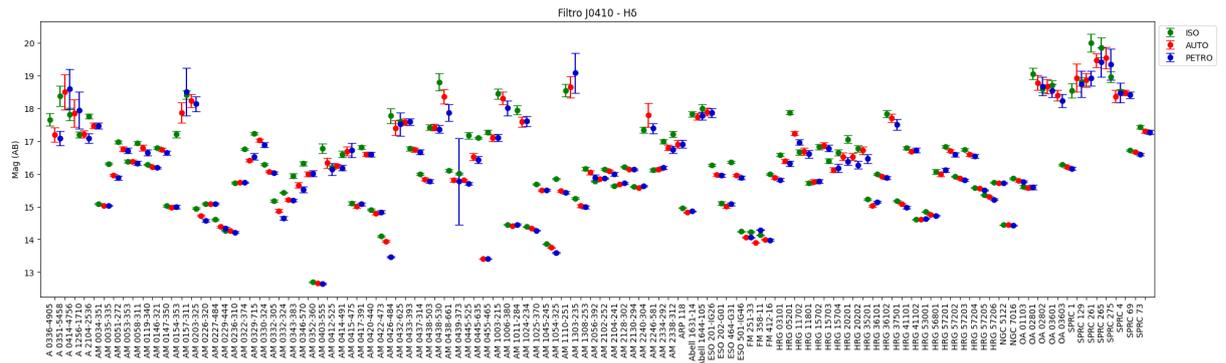


Figura 76

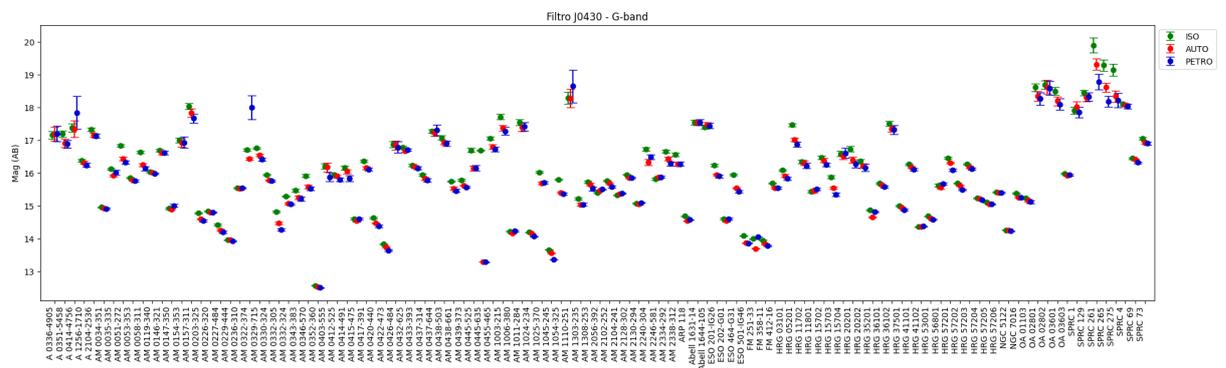


Figura 77

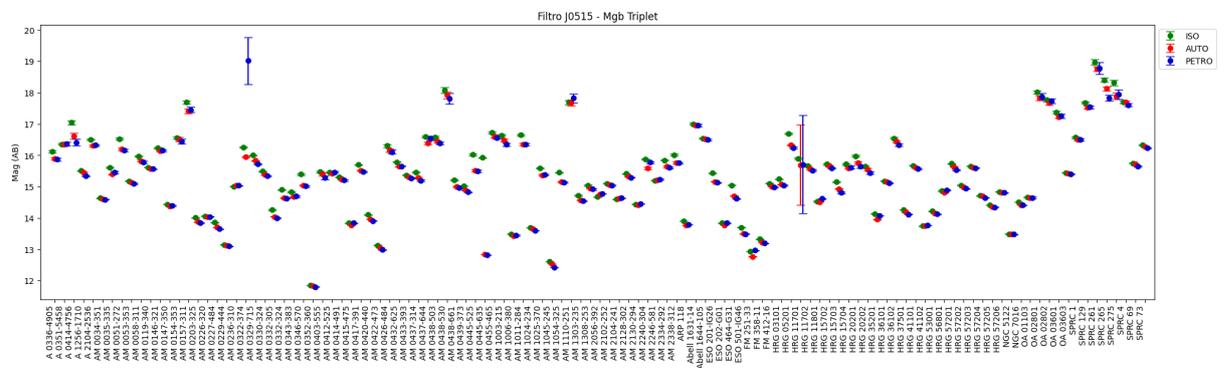


Figura 78

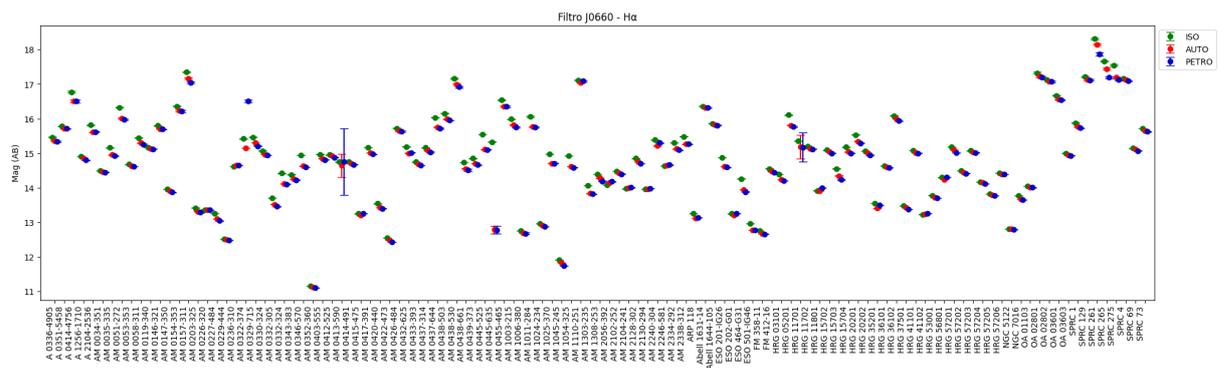


Figura 79

