



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA

BÁRBARA CIBELE RIBEIRO DE VASCONCELOS

POPULAÇÕES ESTELARES EM GALÁXIAS COM FORMAÇÃO ESTELAR

FORTALEZA

2019

BÁRBARA CIBELE RIBEIRO DE VASCONCELOS

POPULAÇÕES ESTELARES EM GALÁXIAS COM FORMAÇÃO ESTELAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Física do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de licenciada em Física.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Brito de Freitas

Coorientador: Msc. Luidhy Santana da Silva

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V45p Vasconcelos, Bárbara Cibele Ribeiro de.
Populações estelares em galáxias com formação estelar / Bárbara Cibele Ribeiro de Vasconcelos. – 2019.
66 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências,
Curso de Física, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Daniel Brito de Freitas.

Coorientação: Prof. Me. Luidhy Santana da Silva.

1. Galáxias. 2. Populações estelares. 3. Síntese semi-empírica. 4. Formação e evolução. I. Título.

CDD 530

BÁRBARA CIBELE RIBEIRO DE VASCONCELOS

POPULAÇÕES ESTELARES EM GALÁXIAS COM FORMAÇÃO ESTELAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Física do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de licenciada em Física.

Aprovada em: 19 de Junho de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Brito de Freitas (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Msc. Luidhy Santana da Silva (Coorientador)
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof. Dr. Afrânio de Araújo Coelho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, por ter me dado a vida e pelo auxílio na manutenção de minha existência neste Universo.

Ao meu orientador, Dr. Daniel Brito de Freitas, por abrir as portas da pesquisa em astrofísica e pela inspiração profissional.

Ao meu coorientador, Ms. Luidhy Santana da Silva, pelas recomendações e correções durante o período de pesquisa.

Ao programa CNPq/PIBIC pelo suporte financeiro durante a reta final da graduação.

Ao curso de Licenciatura em Física, por expandir minha visão sobre a vida acadêmica.

À UFC.

Ao Doutorando em Engenharia Elétrica, Ednardo Moreira Rodrigues, e seu assistente, Alan Batista de Oliveira, aluno de graduação em Engenharia Elétrica, pela adequação do *template* utilizado neste trabalho para que o mesmo ficasse de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

“ A vida não precisa ser fácil, o que importa é
que não seja vazia.”

(Lise Meitner)

RESUMO

Ao estudar galáxias é comum agrupá-las em grupos definidos por tipos ou classificações e observar como suas propriedades podem estar relacionadas. Uma relação existente importante é a exibida entre a Taxa de Formação Estelar (SFR) e a massa desses objetos, que ao ser observada em um grupo de galáxias exibe uma clara tendência crescente que pode ser reconhecida como a sequência principal de galáxias com formação estelar. Porém, dentro de um grupo de galáxias podem existir objetos que se distanciam dessa sequência principal. As populações estelares que constituem estas galáxias podem ser observadas para que possíveis relações existentes sejam obtidas de suas propriedades. Para isso, foi analisada uma amostra de 40 galáxias com limite superior em redshift de aproximadamente 0,05 onde foram feitas medidas das propriedades de suas populações estelares. Os dados utilizados foram obtidos do levantamento espectrofotométrico Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Estes dados são disponibilizados online e de forma gratuita. As propriedades físicas desses objetos foram obtidas através de ajuste de SED utilizando síntese de populações estelares. Esta técnica permite reproduzir o espectro observado do objeto a partir de espectros individuais de populações estelares simples (SSPs), possibilitando obter parâmetros de idade, metalicidade e cinemática para estes objetos. Para isso foi utilizado o código STARLIGHT associado ao modelos de SSPs de Bruzual & Charlot (2003). Por meio dessa técnica foram obtidas as propriedades integradas de cada objeto e relações foram estabelecidas utilizando todos os objetos da amostra. Sendo observado que as galáxias com alta formação estelar apresentam populações jovens sendo tipicamente starbursts ou espirais.

Palavras-chave: Galáxias. Populações estelares. Síntese semi-empírica. Formação e evolução.

ABSTRACT

When studying galaxies it is common to group them into groups defined by types or classifications and observe how their properties may be related. An important existing relationship is between the Star Formation Rate (SFR) and the mass of these objects, which when observed in a group of galaxies exhibits a clear growing trend that can be recognized as the main sequence of star-forming galaxies. However, within a group of galaxies there may be objects that distance themselves from that main sequence. The stellar populations constituting these galaxies can be observed so that possible existing relationships are obtained from their properties. For this, measurements of the properties of the stellar populations from a sample of 40 galaxies with a redshift upper limit of approximately 0.05 were acquired. The data used were obtained from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) spectrophotometric survey. These data are available online and for free. The physical properties of these objects were obtained by adjusting SED using the stellar population synthesis method. This technique allows to reproduce the observed spectrum of the object from individual spectra of simple stellar populations (SSPs), making it possible to obtain parameters of age, metallicity and kinematics for these objects. For this we used the STARLIGHT code associated with the Bruzual and Charlot (2003) SSP models. By means of this technique the integrated properties obtained of each galaxy and relations were established using all the objects of the sample. It is observed that galaxies with high stellar formation present young populations being typically starbursts or spirals.

Keywords: Galaxies. Star populations. Semi-empirical synthesis. Formation and evolution

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fotografia da região onde a Pequena e a Grande Nuvem de Magalhães estão localizadas	14
Figura 2 – Mapa da galáxia proposto por Herschel, em 1785 resultante da contagem de estrelas	15
Figura 3 – Fotografia da vista de um dos domos do Observatório do Monte Wilson (esquerda), e do telescópio Hooker no Observatório do Monte Wilson (direita)	16
Figura 4 – Imagens de V1 e de sua casa galáctica	17
Figura 5 – Flutuações de temperatura na radiação cósmica de fundo medidas pelo WMAP	19
Figura 6 – Cenário monolítico para a formação de galáxias	20
Figura 7 – Esquemática do cenário hierárquico	21
Figura 8 – Diagrama de Hubble	22
Figura 9 – Imagens de exemplos de galáxias elípticas	23
Figura 10 – Imagem de uma galáxias espirais	24
Figura 11 – Imagem de uma galáxia irregular: NGC 6822	25
Figura 12 – Mosaico de imagens das 40 galáxias selecionadas	28
Figura 13 – Fotografias do Apache Point Observatory (esquerda), e do telescópio de 2.5 m do SDSS à noite (direita)	29
Figura 14 – Gráfico da relação entre a massa das galáxias e suas SFR da amostra	30
Figura 15 – Histograma da amostra de 9960 galáxias do SDSS de acordo com suas sSFR	31
Figura 16 – Espectro de uma das 40 galáxias selecionadas da amostra obtida do SDSS .	32
Figura 17 – Diagrama de Cor-Magnitude, uma variante do diagrama HR, para as estrelas do aglomerado M55	34
Figura 18 – Trajetórias evolutivas de estrelas com metalicidade solar na sequência principal	34
Figura 19 – Sequências de tipos espectrais para uma amostra de anãs (a) e de estrelas gigantes (b) da biblioteca estelar MILES	35
Figura 20 – Ajustes feitos com o STARLIGHT de cinco galáxias do SDSS	37
Figura 21 – Gráfico do ajuste feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 227.86595, Dec = 3.51696 e uma imagem da galáxia	38
Figura 22 – Gráfico do ajuste feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 150.42, Dec = 3.00500 e uma imagem da galáxia	39

Figura 23 – Gráfico da relação entre Taxa de Formação Estelar (do Inglês, <i>Star Formation Rate</i>) (SFR) e massa das 40 galáxias selecionadas	39
Figura 24 – Gráfico da relação entre massa e idade das 40 galáxias selecionadas	40
Figura 25 – Gráfico da relação entre dispersão de velocidades (σ) e massa das 40 galáxias selecionadas	41
Figura 26 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 227.865949857258, Dec = 3.51697651442479	46
Figura 27 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 21.8717969156986, Dec = -8.55427250884549	46
Figura 28 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 130.310018382122, Dec = 52.1957359463522	47
Figura 29 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 170.896663957686, Dec = -1.56565227516413	47
Figura 30 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 11.8307994998572, Dec = 14.7034818523249	48
Figura 31 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 150.427984236227, Dec = 3.0049945646724	48
Figura 32 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 169.791682048991, Dec = 66.2164125693813	49
Figura 33 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 237.881873160154, Dec = 52.0948209277313	49
Figura 34 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 151.706164133523, Dec = 1.457306987633	50
Figura 35 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 210.037501403909, Dec = 4.08078498543936	50
Figura 36 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 180.309816862222, Dec = -3.6780965188156	51
Figura 37 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 213.477919712364, Dec = 1.73103875839387	51
Figura 38 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 161.561999478118, Dec = 0.0502550947251813	52

Figura 39 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 228.342068544747, Dec = 0.806493518359825	52
Figura 40 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 232.738865379669, Dec = 54.6918326020705	53
Figura 41 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 239.731994668154, Dec = 239.731994668154	53
Figura 42 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 169.232622407561, Dec = 64.038741322593	54
Figura 43 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 196.398494052729, Dec = 5.19677603560923	54
Figura 44 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 168.234305640224, Dec = -0.909841513179836	55
Figura 45 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 236.569315548837, Dec = 2.41337766241273	55
Figura 46 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 195.850719300151, Dec = -2.17970607464299	56
Figura 47 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 141.124269684834, Dec = 51.7169805652747	56
Figura 48 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 153.179062301702, Dec = 61.5507826322707	57
Figura 49 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 318.862827696552, Dec = -7.99760858853458	57
Figura 50 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 258.975615546905, Dec = 61.3610656038722	58
Figura 51 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 38.1340521649598, Dec = -8.60731445486275	58
Figura 52 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 188.651231749515, Dec = -2.12272221232776	59
Figura 53 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 22.0859447151182, Dec = 15.4691254068453	59
Figura 54 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 213.369716671768, Dec = 1.17031152205646	60

Figura 55 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 345.323539537018, Dec = 13.8750682424864	60
Figura 56 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 24.840529404063, Dec = 14.9882001018212	61
Figura 57 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 171.125137115362, Dec = 2.98422220139096	61
Figura 58 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 202.307377467317, Dec = 62.30921446875	62
Figura 59 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 139.992773095271, Dec = 49.760076523097	62
Figura 60 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 170.821804662055, Dec = 2.70352888650717	63
Figura 61 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 39.4563428398457, Dec = -9.43227251002141	63
Figura 62 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 197.053681620619, Dec = 5.55502863604453	64
Figura 63 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 211.098252641987, Dec = 4.71790459545105	64
Figura 64 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 180.377191979995, Dec = -1.43611318521863	65
Figura 65 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 320.919263171623, Dec = -7.81798647883067	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IMF Função de Massa Inicial (do inglês, *Initial Mass Function*)

SDSS *Sloan Digital Sky Survey*

SFR Taxa de Formação Estelar (do Inglês, *Star Formation Rate*)

sSFR Taxa de Formação Estelar Específica (do Inglês, *Specific Star Formation Rate*)

SSP População Estelar Simples (do Inglês, *Simple Stellar Population*)

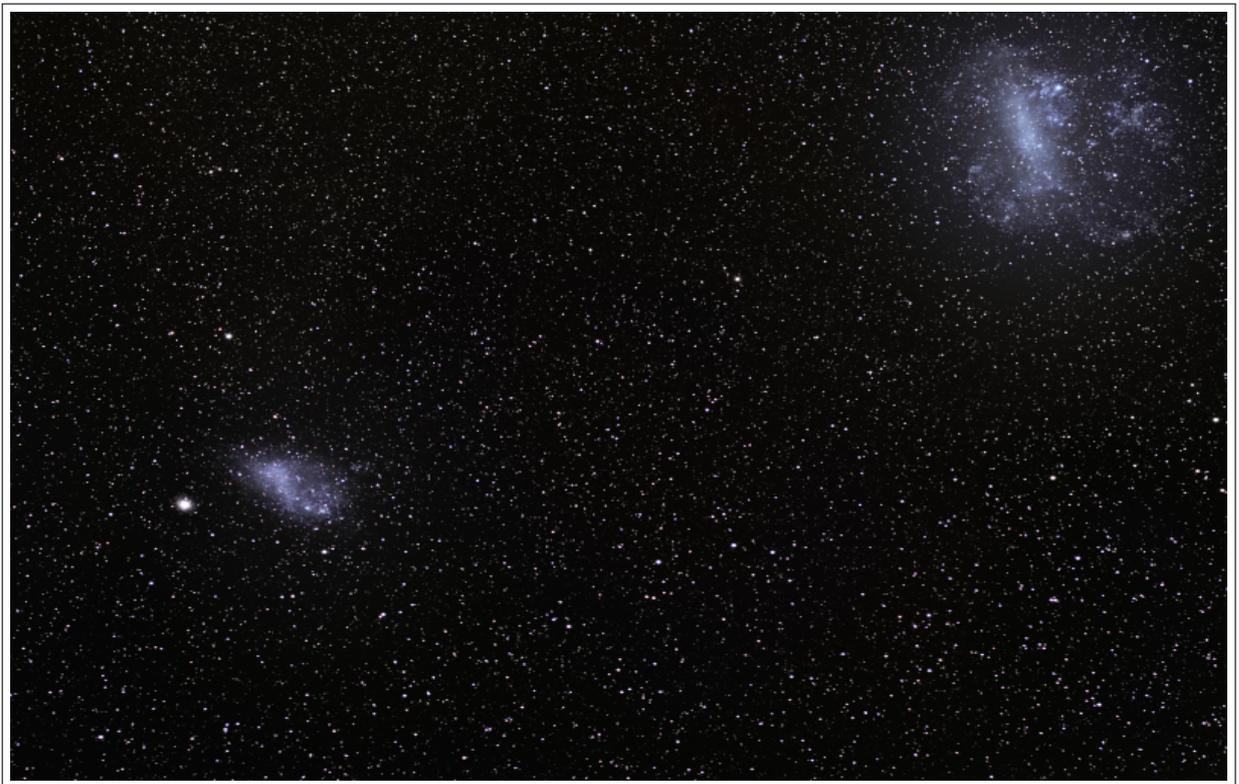
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Formação de Galáxias	19
1.2	Classificação Morfológica de Galáxias	21
1.2.1	<i>Galáxias Elípticas (E)</i>	22
1.2.2	<i>Galáxias Espirais (S)</i>	22
1.2.3	<i>Galáxias Irregulares (Irr)</i>	24
1.2.4	<i>Galáxias Starburst</i>	25
1.3	Evolução Química de Galáxias	26
2	AMOSTRA	28
2.1	Sloan Digital Sky Survey (SDSS)	28
2.2	Seleção das galáxias	29
3	METODOLOGIA	33
3.1	Modelos de Populações Estelares Simples	33
3.2	Síntese de Populações Estelares	35
3.3	Starlight	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	42
	REFERÊNCIAS	43
	APÊNDICES	46
	APÊNDICE A – Ajustes espectrais para as galáxias da amostra	46

1 INTRODUÇÃO

Quando observamos o céu a olho nu não é possível ver além do que está dentro da nossa Galáxia. Do Hemisfério Sul da Terra é possível ver duas grandes manchas difusas, a Grande e a Pequena Nuvem de Magalhães (veja Figura 1), que são galáxias satélites da Via Láctea e no Hemisfério Norte uma mancha difusa chamada galáxia de Andrômeda. Usando um telescópio esse cenário muda e outros objetos podem ser vistos. Porém, nem sempre os astrônomos dispuseram de telescópios para fazer suas observações, conseqüentemente não era possível distinguir o que eram nuvens de poeira ou outros objetos distantes.

Figura 1 – Fotografia da região onde a Pequena e a Grande Nuvem de Magalhães estão localizadas



Fonte: ESO/S. Brunier

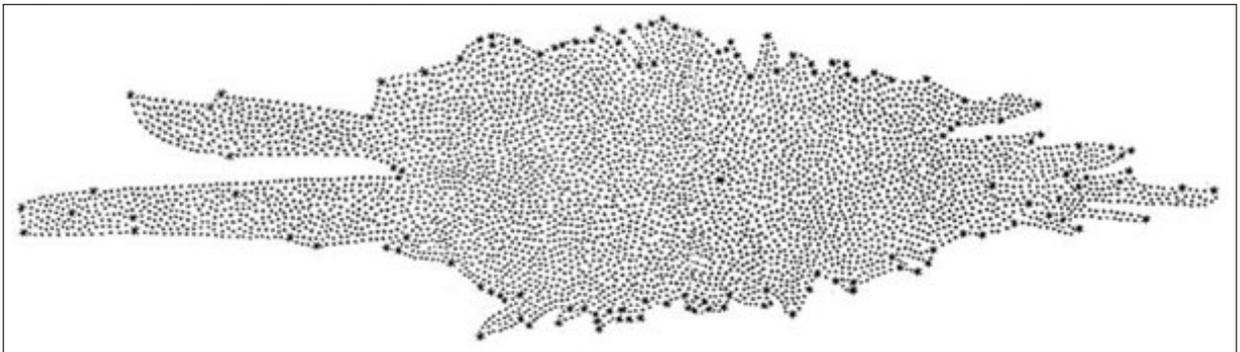
Em 1610, o cientista italiano Galileo Galilei (1564-1642) realizou algumas das primeiras observações astronômicas com um telescópio. Ele rastreou os movimentos de quatro luas brilhantes enquanto orbitavam Júpiter, uma prova importante de que nem todos os objetos no universo orbitavam a Terra como Ptolomeu havia estabelecido. Além disso viu que regiões do céu noturno que pareciam difusas e nebulosas a olho nu na verdade consistiam de estrelas individuais quando vistas através do telescópio (GALILEI; HELDEN, 1989).

Em 1755, o filósofo alemão Immanuel Kant (1724-1804) sugeriu que as nebulosas

seriam sistemas estelares como a Via Láctea, e que as estrelas estariam orbitando o centro da nebulosa como os planetas no sistema solar (KANT, 1755). Esta ideia de Kant introduziu a noção de "universos-ilha", entretanto, Kant não estimou quão distantes da Galáxia esses outros universos estariam exatamente.

O astrônomo Sir William Herschel (1738-1822) foi o primeiro a trazer técnicas observacionais para apoiar o estudo de nebulosas e aglomerados de estrelas. Em 1785 Herschel observou o céu em mais de 600 localidades e fez a contagem de todas as estrelas que conseguiu ver usando os limites de seu telescópio. Assumindo a mesma luminosidade para todas as estrelas, estimou a distância de cada umas delas à Terra e criou o mapa da Galáxia da Figura 2 (HERSCHEL, 1785). No ano seguinte, com a assistência de sua irmã Caroline Herschel, publicou um catálogo com mil nebulosas (HERSCHEL, 1786). Antes disso apenas 103 objetos difusos haviam sido identificados e catalogados por Charles Messier (1730-1817). Dentre eles está Andrômeda, listada como a trigésima primeira entrada no catálogo, M31.

Figura 2 – Mapa da galáxia proposto por Herschel, em 1785 resultante da contagem de estrelas



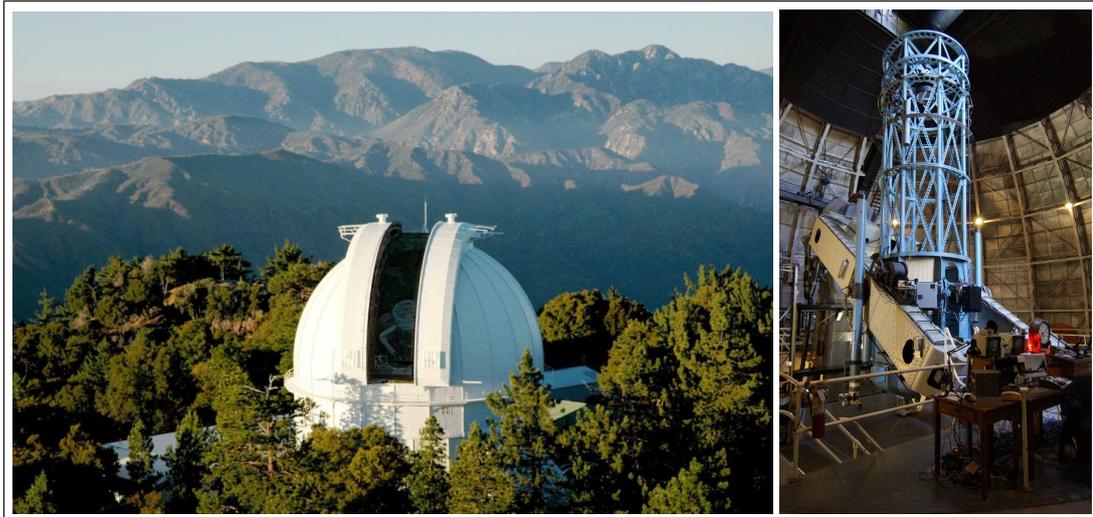
Fonte: (HERSCHEL, 1785)

Apesar destas descobertas a natureza das nebulosas ainda era desconhecida, e não era claro se eram localizadas na região interna ou externa da Via Láctea. Em 1920, essa dúvida foi analisada no que ficaria conhecido como o Grande Debate, realizado entre os astrônomos Harlow Shapley (1885-1972) e Heber Curtis (1972-1942) na Academia de Ciências de Washington. Shapley era a favor da ideia de que a Galáxia seria o Universo inteiro, e que as nebulosas espirais seriam meras nuvens de gás dentro da Via Láctea. Em contraste, Curtis argumentou que o universo era composto por diversas galáxias, e que as nebulosas espirais eram similares a Via Láctea (HETHERINGTON, 1970). O debate terminou inconclusivo até o final de 1923, quando a questão foi resolvida por Edwin Hubble (1889-1953).

Hubble observou a galáxia de Andrômeda com o telescópio Hooker, de 100 polega-

das, no Observatório do Mount Wilson (veja Figura 3). O astrônomo localizou uma Cefeida e, utilizando a calibração das estrelas Variáveis Cefeidas (LEAVITT; PICKERING, 1912), calculou sua distância. A estrela estava a 1 milhão de anos-luz da Terra, uma distância muito maior que o diâmetro da Via Láctea de Shapley.

Figura 3 – Fotografia da vista de um dos domos do Observatório do Monte Wilson (esquerda), e do telescópio Hooker no Observatório do Monte Wilson (direita)



Fonte: Wikipedia

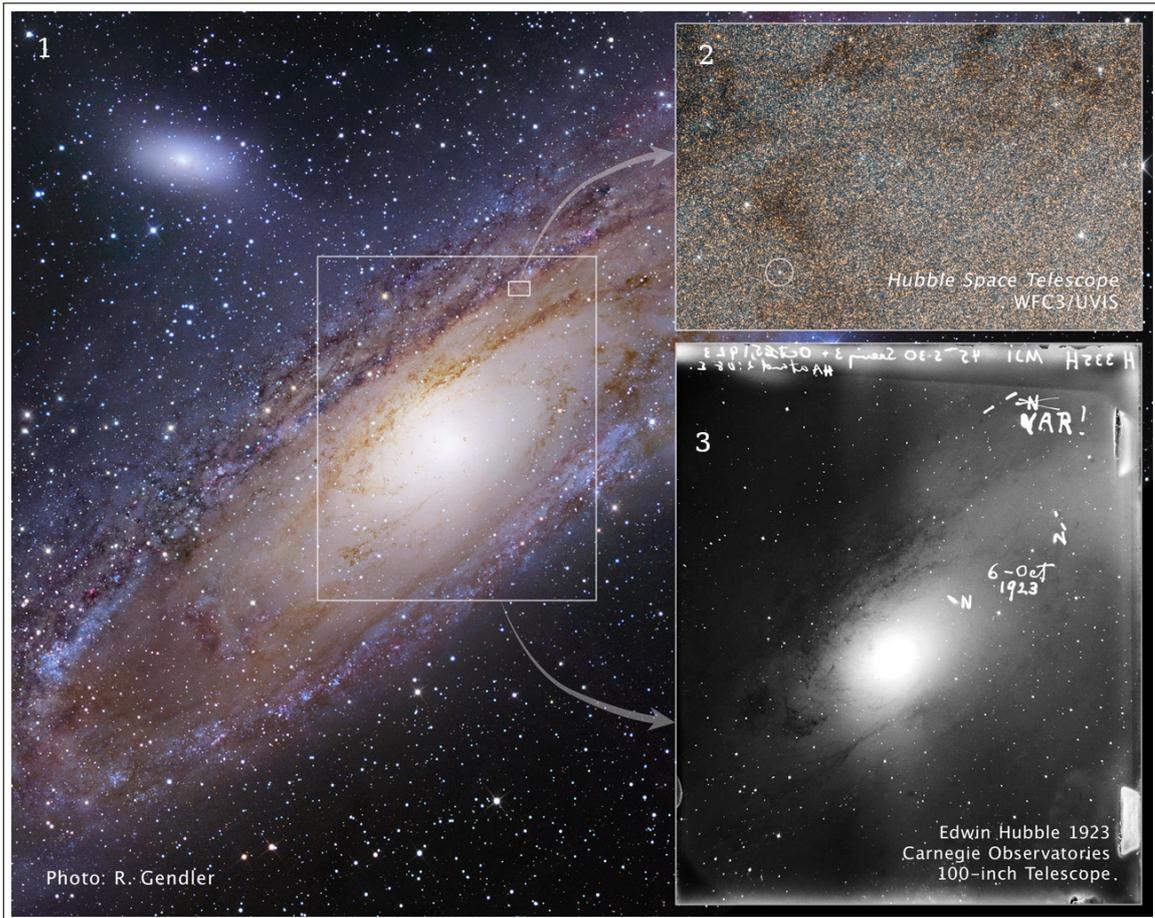
A região observada por Hubble usando o telescópio Hooker, pode ser vista na Figura 4 (1), delimitada pelo retângulo branco maior traçado. O círculo branco na Figura 4 (2) identifica V1, a estrela Variável Cefeida número um descoberta. A Figura 4 (3) mostra uma cópia da imagem de Andrômeda do Hubble, feita em uma placa de vidro de 4 polegadas, onde originalmente identificou três novas, marcado com "N". Posteriormente, ao perceber que a nova do canto superior direito era uma Variável Cefeida, riscou o "N" e marcou "VAR", representando variável. Hubble continuou fazendo suas observações e até o final de 1924 havia encontrado 36 estrelas variáveis em Andrômeda, sendo 12 Cefeidas (HUBBLE, 1925).

A descoberta de Hubble, utilizando a relação distância-luminosidade das Variáveis Cefeidas, mostrou que as nebulosas espirais estavam fora da Via Láctea e introduziu uma nova área do conhecimento, a astronomia extragaláctica. Em 1929, Hubble observou que as galáxias estão se afastando e que as velocidades de recessão das galáxias são proporcionais às suas distâncias, podendo ser escritas por

$$v = H_0 D, \quad (1.1)$$

a chamada Lei de Hubble, onde $H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$ é a constante de Hubble. O afastamento

Figura 4 – Imagens de V1 e de sua casa galáctica



Fonte: NASA, ESA, and Z. Levay (STScI)

das galáxias observado por Hubble indica que o Universo está em expansão e sua lei é uma consequência da isotropia do Universo.

Cada elemento da tabela periódica emite fótons somente em determinados comprimentos de onda. Esses fótons se manifestam como linhas de emissão ou absorção no espectro de um objeto astronômico, e medindo a posição das linhas espectrais é possível determinar quais elementos estão presentes no objeto observado. Porém, devido ao afastamento das galáxias, o que medimos observacionalmente é o desvio para o vermelho dos espectros desses objetos, o *redshift*, z . Sabendo que a velocidade da luz é uma constante, podemos associar a velocidade de recessão de galáxias observadas a uma determinada época do Universo utilizando o *redshift*.

O Universo em expansão sugere que em tempos anteriores a sua densidade era maior. No final da década de 1940, Ralph Alpher (1921-2007), George Gamow (1904-1968) e Hans Bethe (1906-2005) publicaram um importante artigo onde descreviam como os níveis de hidrogênio e hélio eram explicados por reações termonucleares nos primeiros momentos do universo, num processo chamado nucleossíntese primordial (ALPHER *et al.*, 1948). Mas para

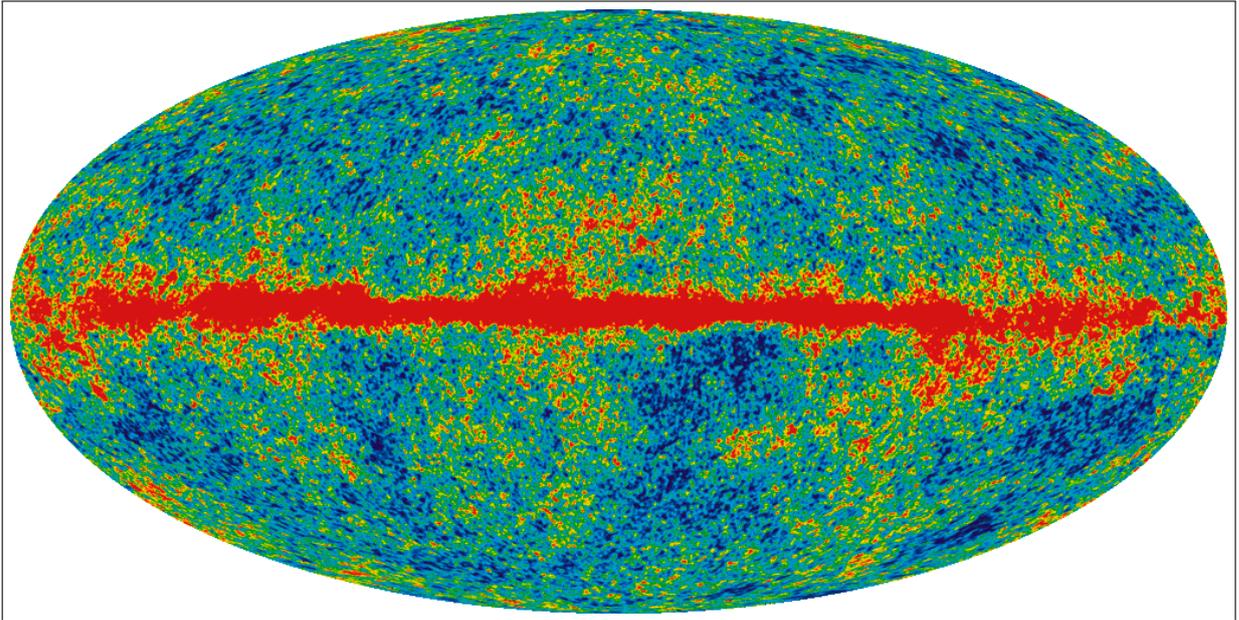
que o modelo estivesse correto o Universo precisava ser tão denso e tão quente em seu estado atual como era em seu estado primordial. Com isso o calor residual poderia ser detectado no Universo contemporâneo como uma radiação que teria um espectro bem definido, o espectro de corpo negro, que depende da sua temperatura. Somente quando Arno Penzias e Robert Wilson descobriram acidentalmente a radiação cósmica de fundo (PENZIAS; WILSON, 1965) as previsões puderam obter suporte.

Com essa descoberta surgiu a possibilidade de usar as propriedades da radiação cósmica de fundo em micro-ondas para investigar como era o Universo no passado. Pela teoria do Big Bang, a radiação tem informações sobre a distribuição de matéria há mais de 10 bilhões de anos. Nesse período as estrelas e galáxias ainda não haviam se formado, e o Universo era constituído de elétrons e partículas nucleares que colidiam com fótons que formavam a radiação de fundo quando tinha uma temperatura que passava dos 3000 °C. Após esse período, a radiação de fundo esfriou o suficiente para que os átomos se formassem da combinação dos elétrons com os núcleos. Como os átomos são neutros, não haviam mais colisões com os fótons da radiação no processo de recombinação dos elétrons livres.

Quando os primeiros átomos se formaram, o Universo apresentava pequenas variações de densidade. O fenômeno da instabilidade gravitacional experimentada por pequenas regiões com densidades de matéria acima da média em um Universo em expansão origina a formação de concentrações localizadas de matéria. Em cenários astrofísicos a teoria que descreve a instabilidade gravitacional é a instabilidade de Jeans. Nela o sistema é composto por partículas que podem agregar-se dependendo da magnitude relativa da força de pressão e da força gravitacional. Dessa forma, uma região muito densa se expande mais lentamente do que o Universo médio devido à sua autogravidade. O crescimento de flutuações de densidade no tempo causa a formação de estruturas de grande escala, e também é responsável pela formação das galáxias e aglomerados. (SCHNEIDER, 2006).

As provas observacionais destas flutuações no Universo primordial foram obtidas pelo projeto WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*). A Figura 5 mostra toda a esfera celeste em coordenadas galácticas da radiação cósmica de fundo obtidas no projeto, subtraídas as componentes de dipolo cinemático. Dessa maneira o que é observado na imagem são as flutuações de temperatura que induziram, gradualmente, a formação das estruturas observadas no Universo atual.

Figura 5 – Flutuações de temperatura na radiação cósmica de fundo medidas pelo WMAP



Fonte: (WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE, 2018)

1.1 Formação de Galáxias

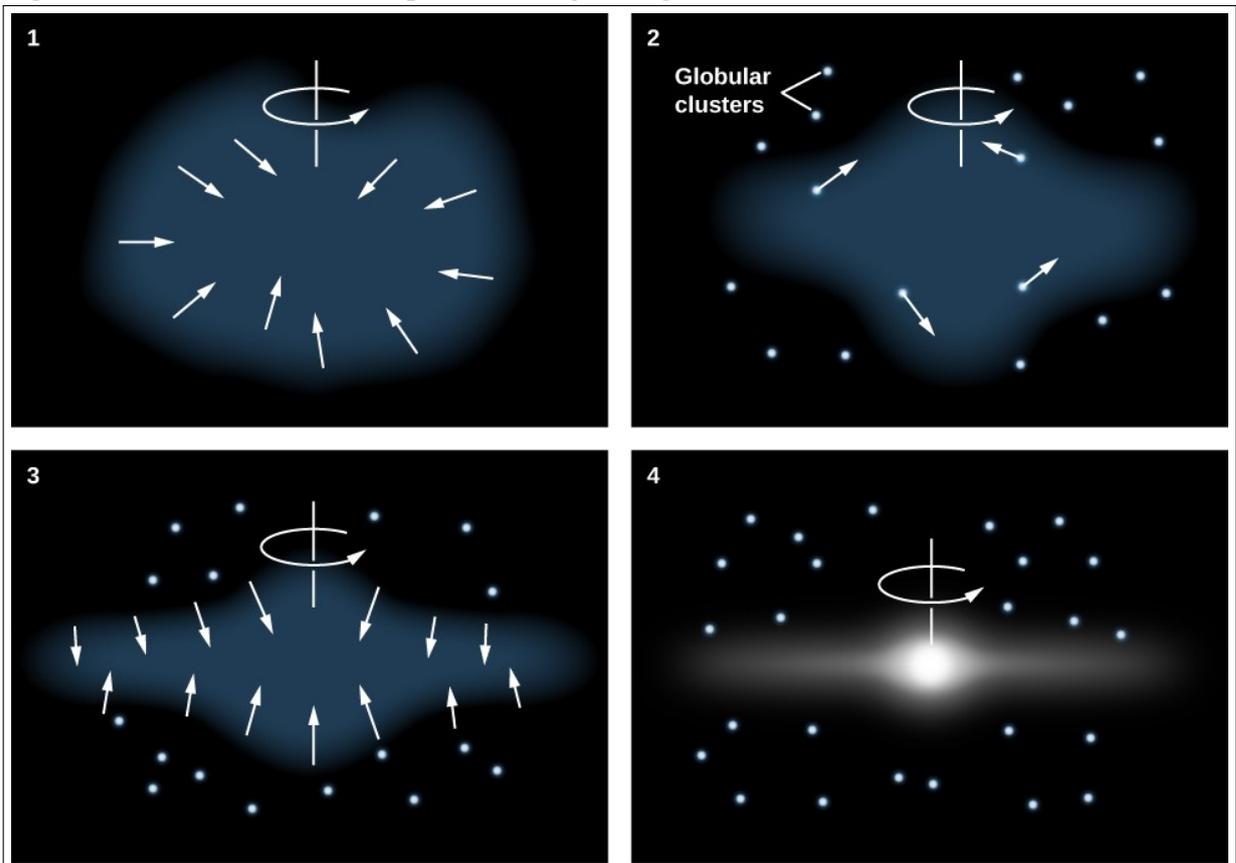
Os modelos cosmológicos que simulam a formação das galáxias usam como base as flutuações de densidade que possibilitam a aglutinação de matéria e a formação de estruturas. Uma massa favorável ao colapso gravitacional no cenário do Universo Primordial é de aproximadamente 1 milhão de massas solares (DA SILVA, 2016), e é a chamada massa de Jeans primordial. A massa de Jeans está relacionada ao critério de instabilidade de Jeans, que diz que dada uma determinada região do Universo, uma nuvem de gás com temperatura e densidade de massa qualquer, que satisfaz o critério ($M_{nuvem} > M_{jeans}$), perde o equilíbrio gravitacional e colapsa. Assim, as regiões que obedecem o critério de Jeans local possibilitam a formação de protogaláxias e estrelas. Quando a massa agregada se torna gravitacionalmente estável uma protogaláxia se forma. Na formação das galáxias parte do gás que estava na nuvem que a originou é convertido em estrelas. A produção de estrelas na galáxia é representada pela SFR. Essa taxa de formação é proporcional a densidade de gás frio dividida pela escala de tempo da formação estelar.

Durante as décadas de 1960 e 1970 surgiram modelos simplificados que explicavam a formação das galáxias sendo propostos primeiramente para a formação da Via Láctea. Os modelos do colapso monolítico, (EGGEN *et al.*, 1962), e de aglomeração hierárquica, (LACEY; COLE, 1993) descrevem a formação de galáxias.

O cenário do modelo do colapso monolítico (EGGEN *et al.*, 1962), apresenta uma

nuvem protogaláctica esférica contendo toda essência do material da Via Láctea que começa a colapsar gravitacionalmente. Nesse cenário a densidade do gás nas regiões centrais cresce e consequentemente a SFR aumenta. Portanto, a primeira geração de estrelas que se forma no momento do colapso, tem órbitas de alta excentricidade, metalicidade baixa e constitui o bojo. Enquanto a primeira geração de estrelas evolui, o gás restante se enriquece com os elementos químicos resultantes da nucleossíntese estelar enquanto forma o disco. Assim, as estrelas que constituem o disco possuem órbitas quase circulares, alta metalicidade e são mais jovens que as do bojo. Esse cenário tem suas limitações, como não explicar naturalmente a distribuição de metalicidade dos aglomerados e nem porque o disco da Galáxia não possui rotação significativa. A Figura 6 mostra a esquematização desse modelo para a Via Láctea. Inicialmente uma nuvem rotativa de gás entra em colapso devido à gravidade, estrelas do halo e aglomerados globulares formam-se antes do colapso ou formam-se em outro lugar, e estrelas do disco se formam posteriormente.

Figura 6 – Cenário monolítico para a formação de galáxias

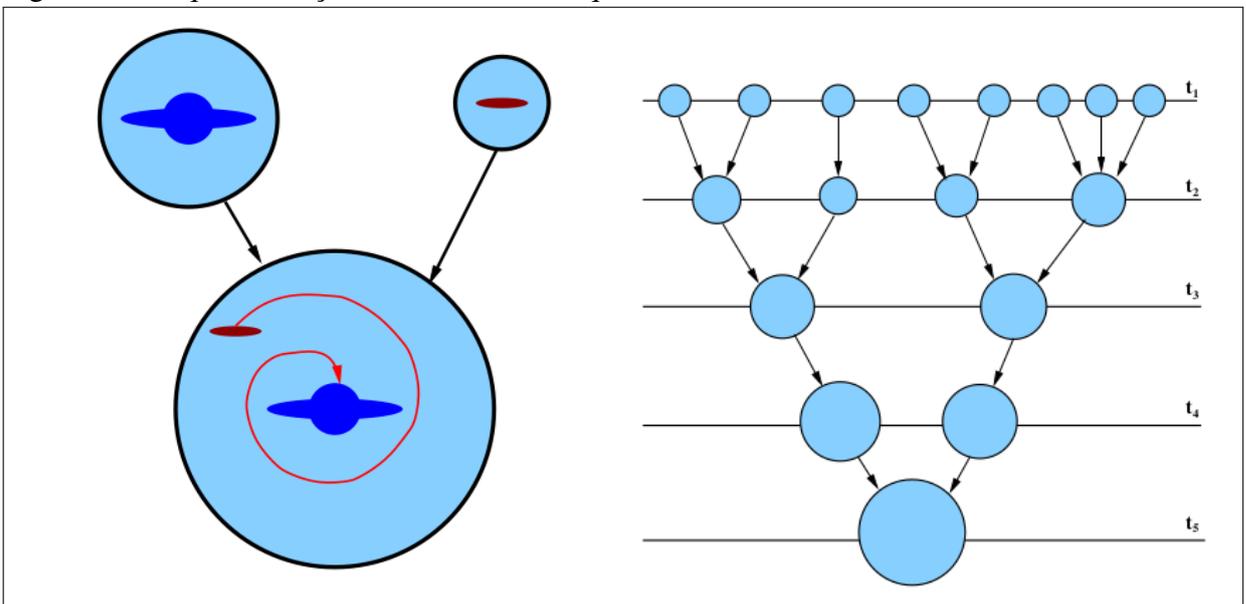


Fonte: (LUMEN LEARNING ASTRONOMY, 2019)

No cenário hierárquico o halo da Galáxia é formado gradualmente pela fusão de duas galáxias (veja Figura 7). A formação acontece por meio do resfriamento e colapso do gás

de bárions em halos de matéria escura em equilíbrio. Ao mesmo tempo que o gás é resfriado e colapsado, ocorre a fusão entre esses halos formando estruturas maiores. Neste modelo, a amplitude das flutuações cai com o aumento da escala, ou seja, objetos de baixa massa sofrem processo de fusão formando objetos mais massivos. As pequenas nuvens de gás em contração dão origem preferencialmente a sistemas puramente discoidais, que evoluem para galáxias espirais se sofrerem poucas interações entre si, ou a elípticas, no caso de encontros e fusões serem muito frequentes. No cenário hierárquico, o fator determinante para a evolução da galáxia é o meio em que ela se encontra.

Figura 7 – Esquemática do cenário hierárquico



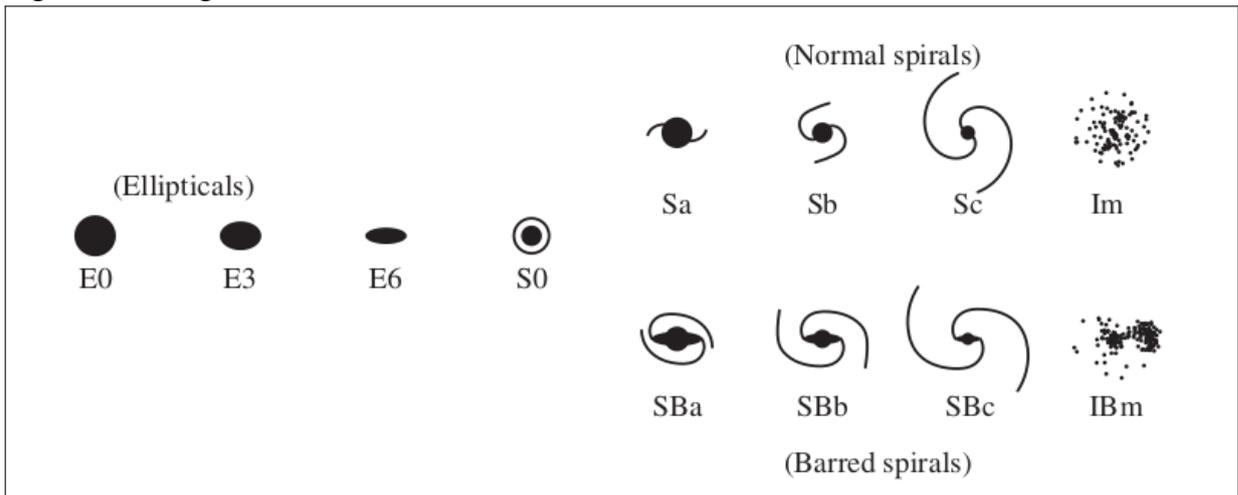
Fonte: (BAUGH, 2006)

O esquema representa a fusão de protogaláxias no cenário hierárquico para a formação de galáxias (esquerda), e de uma árvore de fusões de halos de matéria escura (direita).

1.2 Classificação Morfológica de Galáxias

Existem diferentes tipos de galáxias, com histórias evolucionárias e aparência distintas distribuídas pelo Universo. Hubble foi o primeiro a categorizar esses diferentes tipos se baseando pela aparência dos objetos e estabelecendo uma sequência evolutiva em um diagrama (ver Figura 8). Hoje sabemos que a classificação estabelecida por Hubble não representa uma sequência de evolução das galáxias mas a nomenclatura continua sendo usada para classificar morfológicamente as galáxias. Originalmente Hubble propôs três classes: elípticas (E), espirais (S) e irregulares.

Figura 8 – Diagrama de Hubble



Fonte: (MO *et al.*, 2010)

O diagrama mostra a classificação morfológica de galáxias proposta por Hubble

1.2.1 Galáxias Elípticas (E)

Galáxias elípticas (ver Figura 9) recebem esse nome por causa de sua forma, e subdivididas de acordo com sua elipticidade

$$\varepsilon \equiv 1 - \frac{b}{a} \quad (1.2)$$

, onde a e b denotam o raio maior e menor da elipse. A notação E_n é usada para classificar as elípticas de acordo com ε , por exemplo uma galáxia com $n = 10\varepsilon$, isto é, uma galáxia E4, tem uma razão $\frac{b}{a} = 0,6$.

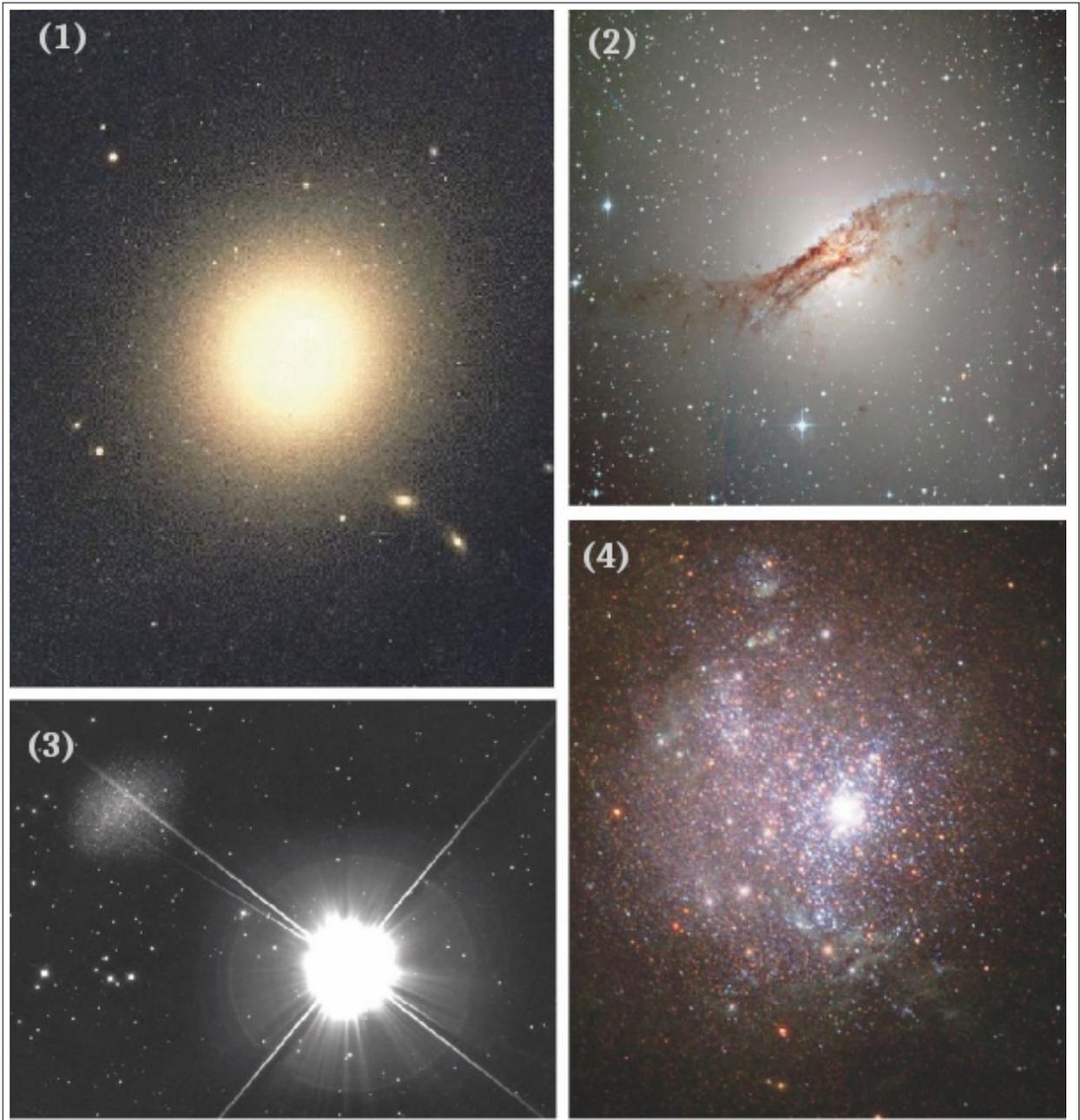
Esses objetos apresentam suaves variações de brilho com o nível de luminosidade decrescendo de forma constante do centro para as regiões externas. A maioria das galáxias elípticas são encontradas em aglomerados de galáxias. Nesses aglomerados, por volta de 75% das galáxias são elípticas (SCHNEIDER, 2006) o que sugere que foram formadas em regiões de alta densidade, e por consequência têm uma idade maior.

Todas as galáxias elípticas têm a praticamente a mesma cor: um tanto mais avermelhadas que o Sol. Essa cor avermelhada vem das estrelas mais velhas e frias, o que sugere que a maioria das elípticas se formou há muito tempo. A cor ser a mesma ao longo da galáxia indica que grande parte das estrelas nessas galáxias se formaram aproximadamente ao mesmo tempo.

1.2.2 Galáxias Espirais (S)

Objetos nessa sequência são referidos frequentemente de *late type* devido a sua localização no diagrama, porém sabemos que esta é uma denominação histórica e não evolutiva.

Figura 9 – Imagens de exemplos de galáxias elípticas

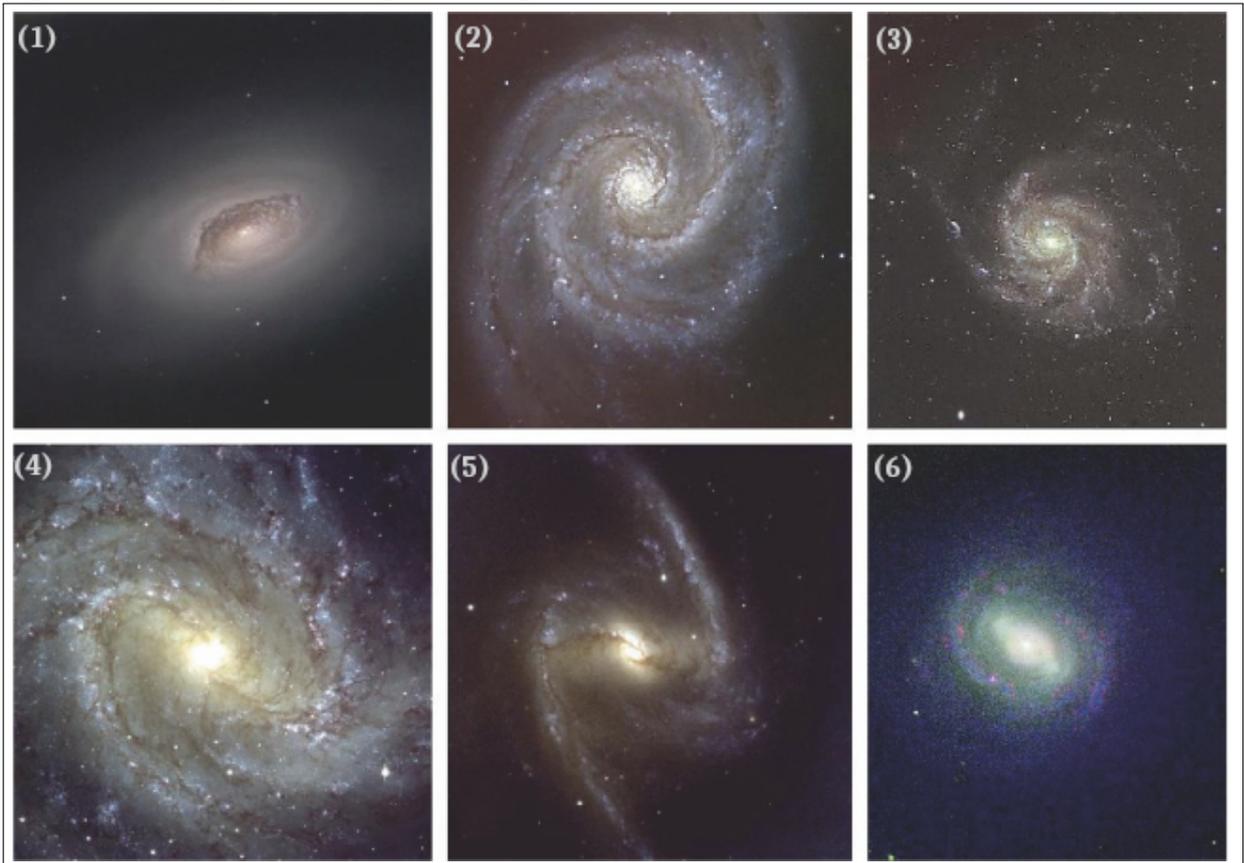


Fonte: (SCHNEIDER, 2006)
 Imagens da galáxia M87 (1), Centaurus A (2), Leo I (3), NGC 1705 (4).

As galáxias espirais consistem de um disco de estrelas e um bojo luminoso, chamado de núcleo, em seus centros envolvidos por braços espirais (ver Figura 10) e um halo maior de estrelas envolve o núcleo e os braços. Os braços espirais provavelmente se formam como resultado de ondas que atravessam a região do disco galáctico. Essas ondas comprimem nuvens de gás interestelar causando a formação de novas estrelas fazendo com que os braços das espirais sejam mais luminosos pela presença de estrelas mais massivas e jovens, quentes e brilhantes, já os espaços entre os braços contêm estrelas mais velhas e em algumas espirais, essa onda de

densidade de estrelas organiza as estrelas centrais em uma barra. Na classificação de Hubble as espirais estão divididas em duas subclasses: espirais normais (S) e espirais barradas (SB). Em cada uma dessas subclasses a sequência é determinada pela razão de luminosidade entre do disco e do bojo, que é denominada por a, ab, b, bc, c, cd, d.

Figura 10 – Imagem de uma galáxias espirais



Fonte: (SCHNEIDER, 2006)

Imagens dos tipos de galáxias espirais. A M94 (1) que é uma galáxia Sab, a M51 (2) que é uma Sbc, a M101 (3) que é uma Sc, a M83 (4) que é uma SBa, a NGC 1365 (5) que é uma SBb, e a M58 (6), que é uma galáxia SBc.

1.2.3 Galáxias Irregulares (Irr)

A classe das galáxias irregulares contém uma miscelânea de formas. Nessa classe estão as galáxias que não se parecem nem com espirais, nem com elípticas. Qualquer galáxia que tenha forma não identificável é classificada como irregular (ver Figura 11).

Figura 11 – Imagem de uma galáxia irregular: NGC 6822



Fonte: NASA

1.2.4 Galáxias Starburst

Galáxias espirais como a via láctea formam novas estrelas com uma SFR de $\sim 3M_{\odot}$, entretanto, existem galáxias que apresentam uma SFR muito maior, $\gtrsim 100M_{\odot}$ (SCHNEIDER, 2006). Essas galáxias são chamadas de *starburst* e são onde aproximadamente 25% de todas as estrelas massivas no universo local são formadas. A razão para a alta SFR é presumivelmente a interação com outras galáxias ou o resultado de processos de fusão (SCHNEIDER, 2006). Entretanto, muitas starbursts não são encontradas em sistemas em interação.

As starbursts mais luminosas no universo são as chamadas “galáxias infravermelhas ultra luminosas”, que têm luminosidades bolométricas de cerca de $10^{12}L_{\odot}$. A fonte de energia das starbursts está dentro de uma região densa de poeira de gás molecular de apenas centenas de parsecs. A massa do gás molecular ($M \sim M_{\odot}$) é comparável a massa do meio interestelar em uma galáxia espiral grande. (MURDIN, 2001)

1.3 Evolução Química de Galáxias

A evolução química das galáxias é governada por vários fatores como a taxa de formação estelar, o espectro de massa, sua evolução através de sucessivos ciclos termonucleares e a dinâmica do sistema gás-estrela. Cada geração de estrelas contribui para o enriquecimento químico da galáxia processando novo material no interior estelar e restaurando uma fração de sua massa para o meio interestelar, na forma tanto de matéria processada como não-processada. A próxima geração de estrelas se forma então desse gás enriquecido começando um novo processo que cessa quando todo o gás disponível for consumido. Assim, a ocorrência de gradientes de metalicidade podem dar pistas sobre o cenário em que a galáxia foi formada.

Estrelas são relativamente bem entendidas, elas são luminosas porque transformam hidrogênio em hélio através do processo de fusão nuclear e assim produzem elementos mais pesados, como carbono, nitrogênio e oxigênio. As mortes estelares em explosões de supernovas liberam esses produtos e também criam elementos mais pesados. O ponto crítico é que as estrelas de baixa massa têm vidas comparáveis à idade do Universo. Isso significa que muitas estrelas que se formaram no início do Universo ainda podem apresentar as mesmas propriedades químicas do gás que elas formaram originalmente.

No modelo de formação hierárquico os gradientes de idade e metalicidade são menos intensos. Nesse cenário de formação a fusão de galáxias com o gás causa uma mistura do gás que formará as estrelas diminuindo as diferenças de metalicidade consequentemente diminuindo o valor absoluto do gradiente negativo de metalicidade final (DA SILVA, 2016). As estrelas mais antigas em galáxias anãs são as menos quimicamente enriquecidas, e elas se sobrepõem às mais antigas estrelas galácticas do halo. Esta sobreposição define o período de tempo durante o qual as galáxias anãs poderiam ter contribuído significativamente para a construção do halo da Via Láctea. Isso ocorre durante o primeiro bilhão de anos de formação de estrelas, em redshifts, $z > 5$.

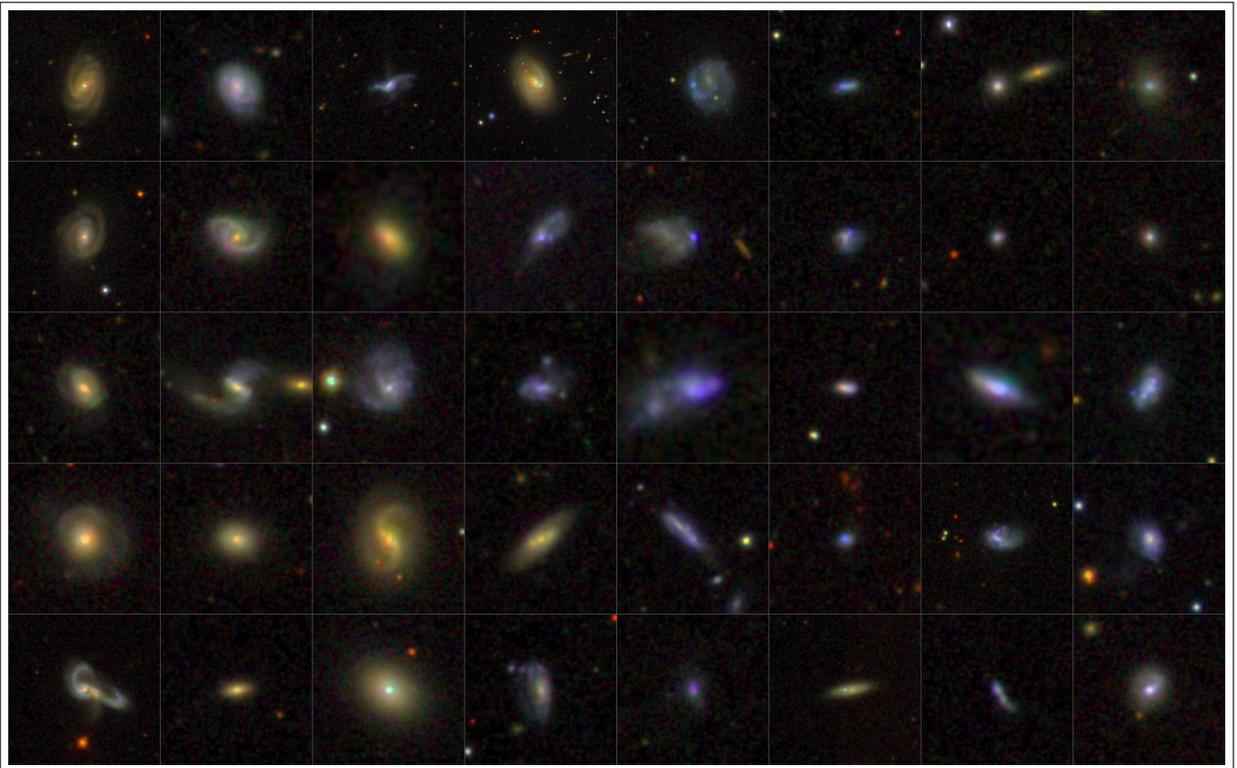
Determinar razões de abundância em galáxias não resolvidas é mais difícil que no grupo local visto que a abundância dos elementos são obtidas de espectros integrados convoluídos com menor resolução que em estrelas individuais fazendo com que as medidas das linhas de absorção sejam quase sempre misturas de linhas atômicas ou moleculares individuais e isso as torna mais complicadas de serem analisadas (PELETIER, 2014). Por isso as medidas podem ser feitas usando modelos de Populações Estelares Simples (SSPs). Esses modelos são conjuntos homogêneos de estrelas em termos de metalicidade e idade que são combinados linearmente

baseados numa soma de critérios de espectros estelares para representar da melhor forma alcançável o espectro integrado de uma galáxia.

2 AMOSTRA

As galáxias estudadas neste trabalho foram selecionadas de uma amostra de 9960 galáxias com limite superior em *redshift* de aproximadamente 0,05, obtidas a partir do levantamento espectrofotométrico *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). Dessa amostra foram selecionadas 40 galáxias, (ver Figura 12), que se distanciam da sequência principal de galáxias *star forming*, considerando a relação entre massa e SFR.

Figura 12 – Mosaico de imagens das 40 galáxias selecionadas

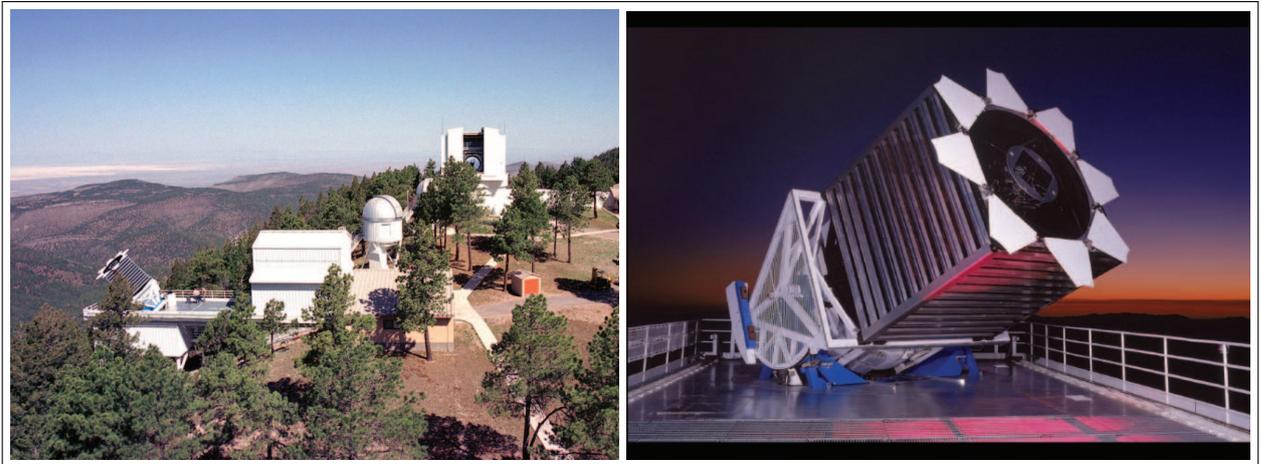


Fonte: Sloan Digital Sky Survey

2.1 Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

O SDSS é um levantamento espectrofotométrico que usa um telescópio óptico angular de 2,5 m localizado no Apache Point Observatory, no estado do Novo México (ver Figura 13). As imagens são obtidas usando uma câmera de 142 megapixels (GUNN *et al.*, 2006) que reúne dados em cinco bandas, u, g, r, i, z. Estas imagens são processadas usando software especializado, e são astrométrica e fotometricamente calibradas, usando observações de um conjunto de estrelas padrão primárias observadas por um telescópio vizinho de 20 polegadas (REIS *et al.*, 2012).

Figura 13 – Fotografias do Apache Point Observatory (esquerda), e do telescópio de 2.5 m do SDSS à noite (direita)



Fonte: (GUNN *et al.*, 2006)

Os dados do SDSS são disponibilizados em *Data Releases*, DR, a cada lançamento um artigo é publicado descrevendo os dados e como foram adquiridos entre outros detalhes do projeto. Os dados do SDSS podem ser acessados pelo servidor *SkyServer* através de uma busca em SQL no site do projeto, <http://skyserver.sdss.org>, que também fornece uma série de tutoriais para o auxílio na obtenção dos dados.

2.2 Seleção das galáxias

A amostra utilizada contém 9960 galáxias obtidas do DR15 do SDSS, com redshift entre 0,01 e 0,05. A query do skyserver a seguir foi utilizada para selecionar as 10000 a serem analisadas, que após a retirada de dados com erros, resultaram na amostra de 9960 galáxias.

Código-fonte 1 – Query do SkyServer que seleciona as 10000 galáxias estudadas

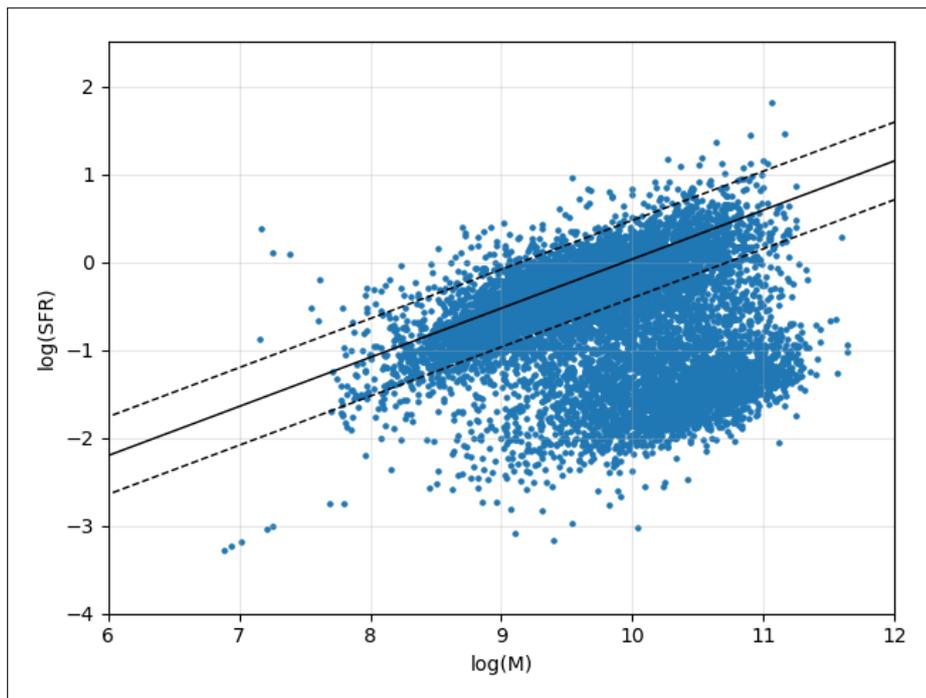
```

1 SELECT top 10000 p.ObjID, p.ra, p.dec, s.plate, s.MJD, s.
   fiberID, p.dered_u, p.dered_g, p.dered_r, p.petroR50_r,
   s.z as redshift, g.lgm_tot_p50 as logMass, g.sfr_tot_p50
   as logSFR, z.p_el_debiased, z.p_cs_debiased
2 FROM SpecObj s, Galaxy p, galSpecExtra g, Zoospec z
3 WHERE p.ObjID=s.BestObjID AND g.SpecObjID=s.SpecObjID AND p
   .ObjID=z.ObjID AND s.z between 0.01 and 0.05 AND z.nvote
   > 9 AND p.clean=1 AND s.zWarning=0

```

O gráfico da Figura 14 mostra a relação entre a massa e a SFR de todas as galáxias da amostra. A linha contínua é a sequência principal de galáxias *star forming*, e as duas linhas tracejadas são desvios da sequência de aproximadamente 2 dex. Nesse gráfico também é possível observar a sequência vermelha e nuvem azul. A sequência vermelha, localizada na região abaixo do desvio inferior da sequência principal, inclui as galáxias vermelhas, que são geralmente elípticas. A nuvem azul, localizada acima da sequência principal, inclui galáxias azuis que são, geralmente espirais.

Figura 14 – Gráfico da relação entre a massa das galáxias e suas SFR da amostra



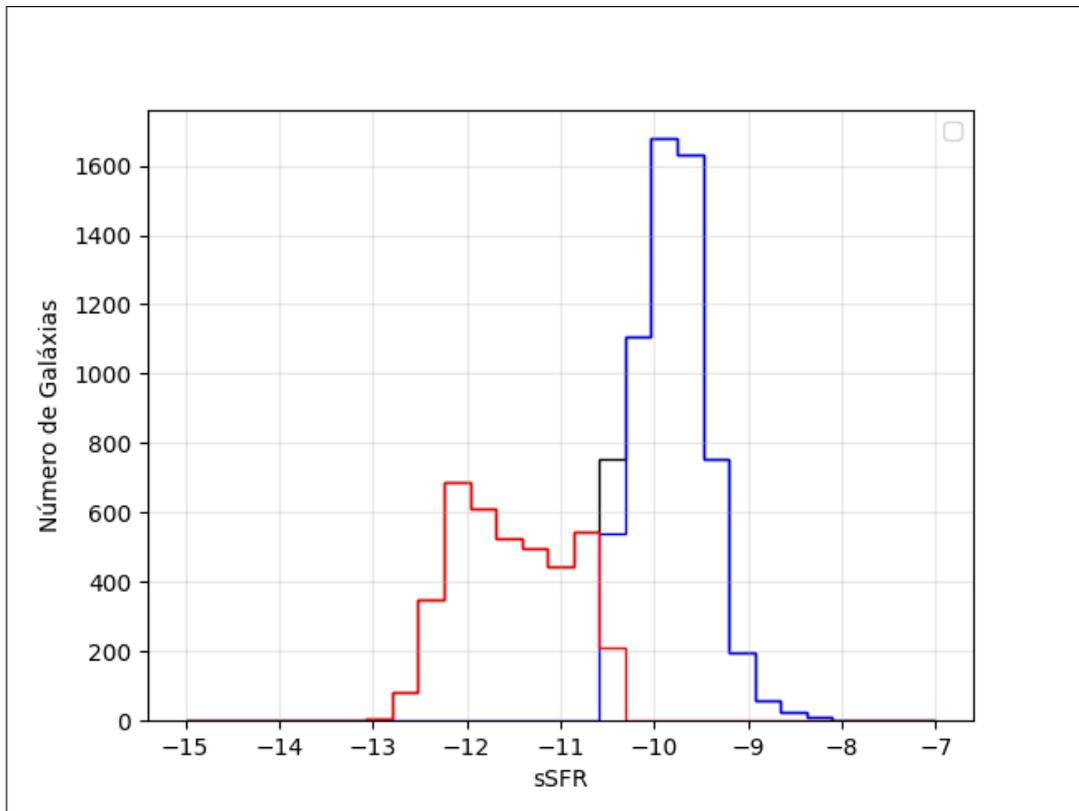
A inclinação da sequência principal de galáxias *star forming* é a chamada Taxa de Formação Estelar Específica (do Inglês, *Specific Star Formation Rate*) (sSFR), sendo descrita por

$$sSFR = \frac{SFR}{Massa}. \quad (2.1)$$

A Figura 15 mostra a distribuição de todas as galáxias da amostra com relação à sSFR. Nesse gráfico é possível observar as galáxias com atividade de formação, que mostram valores mais altos de sSFR, e também galáxias quiescentes, que apresentam valores menores.

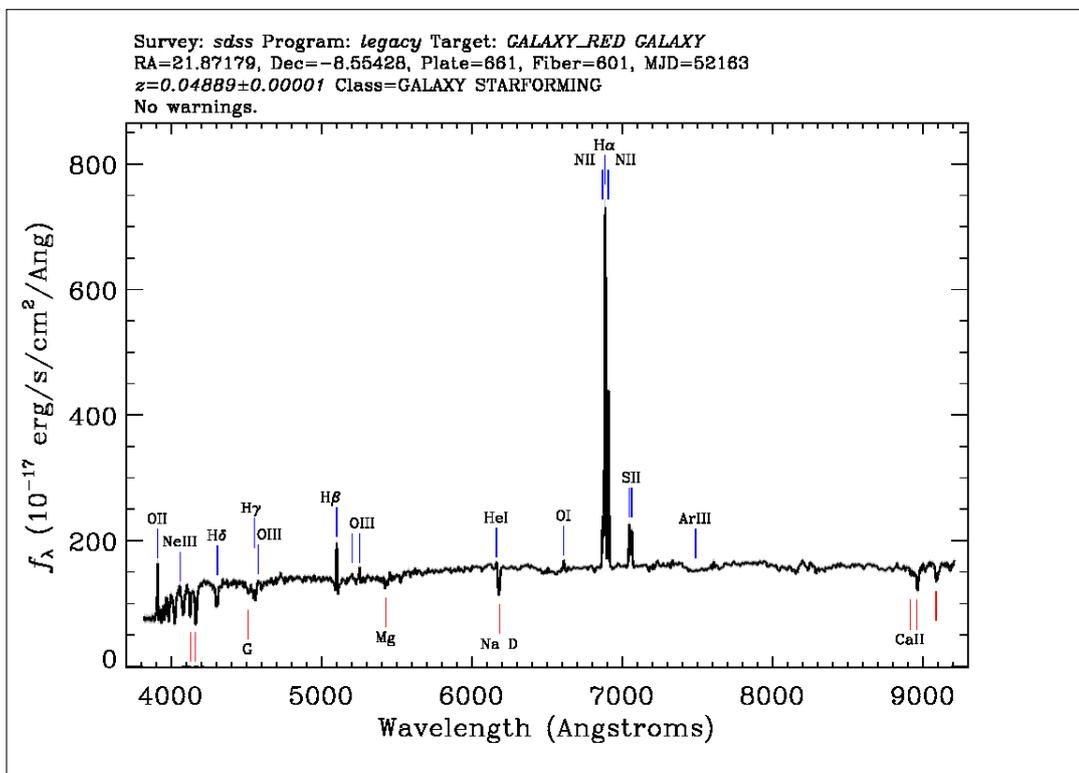
A partir disto, foram selecionadas 40 galáxias acima do desvio superior, ou seja, fora da sequência principal das *star forming*. Os espectros completos das galáxias escolhidas foram

Figura 15 – Histograma da amostra de 9960 galáxias do SDSS de acordo com suas sSFR



obtidos através do *SkyServer*. A Figura 16 mostra o exemplo de um destes espectros, que são resultantes da combinação do espectro das estrelas que estão localizadas no interior das galáxias.

Figura 16 – Espectro de uma das 40 galáxias selecionadas da amostra obtida do SDSS



3 METODOLOGIA

3.1 Modelos de Populações Estelares Simples

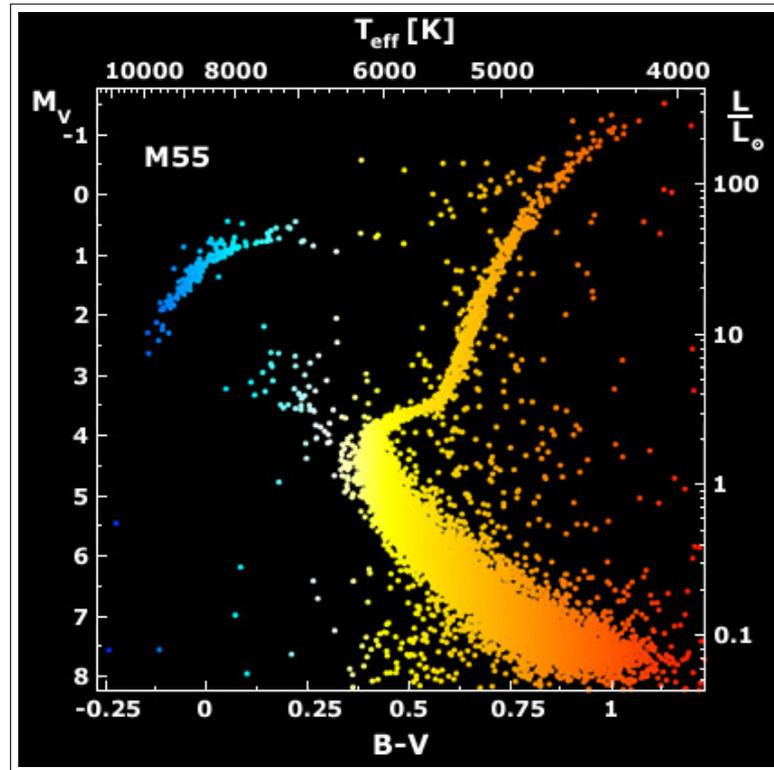
Em 1944, Baade foi capaz de resolver a M31 e suas companheiras em estrelas individuais (BAADE, 1944). Percebendo que as populações estelares na NGC 205 e na M32 eram similares as estrelas em aglomerados globulares da nossa Galáxia, Baade estabeleceu que as populações estelares podem ser categorizadas em dois grupos: População I e População II.

A População I tem estrelas com velocidade relativa pequena em relação ao Sol, jovens, quentes, de alta metalicidade, $Z \sim 0,02$, e localizadas nos braços espirais. A População II possui estrelas com alta velocidade, velhas, frias, com baixa metalicidade, $Z \sim 0,002$ e preferencialmente localizadas no halo da galáxia. A partir do estudo de Baade é possível definir os tipos de populações estelares que aparecem na classificação morfológica de Hubble. As galáxias elípticas apresentam predominantemente a População II, galáxias do tipo irregular consistem de estrelas da População I e as espirais possuem uma mistura dos dois tipos de população estelares.

Uma SSP consiste de um conjunto de estrelas que apresentam a mesma idade e metalicidade entre si, e que originaram-se de uma mesma nuvem molecular em um único burst de formação estelar. De forma hipotética podemos dizer que são estrelas que se formaram a partir de uma mesma nuvem de gás e poeira apresentando uma composição química uniforme. Cada estrela tem uma trajetória evolutiva especial no diagrama HR (Hertzsprung-Russel) que depende da massa estelar inicial e sua metalicidade não estando num sistema binário com troca de matéria. De forma simplificada as SSPs são conjuntos de estrelas que iniciam suas evoluções na sequência principalmente de idade zero simultaneamente.

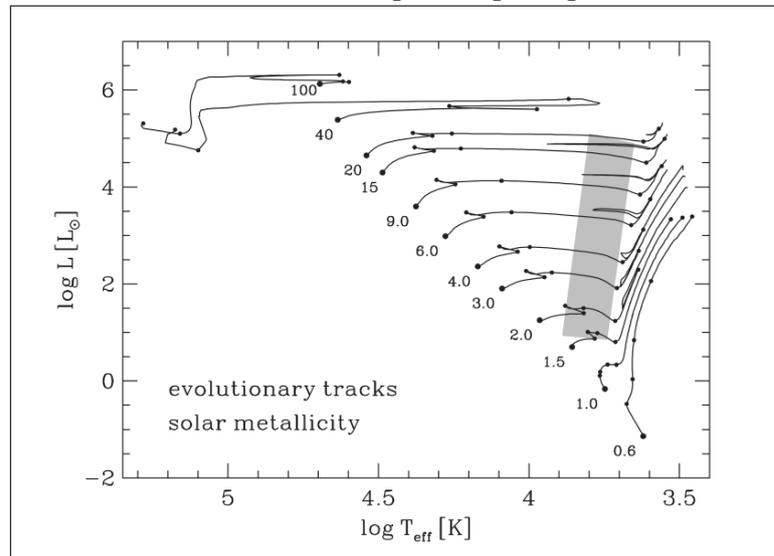
Um modelo de população estelar simples tem ingredientes bem definidos para a sua construção, como a Função de Massa Inicial (do inglês, *Initial Mass Function*) (IMF), as trajetórias evolutivas para diferentes massas iniciais, e as bibliotecas estelares. A IMF é a função que expressa o número de estrelas que nascem quando há formação estelar. Um típico Diagrama de Hertzsprung-Russell, como o da Figura 17, traça um único ponto para representar a cor e a luminosidade de uma estrela como é observada. Pela teoria de evolução estelar sabemos o tempo de vida de uma estrela isolada na sequência principal e que a sua trajetória no diagrama HR dependerá da sua massa e de sua metalicidade. Dessa forma as trajetórias evolutivas são as trajetórias de vida de uma estrela no Diagrama HR, como as traçadas na Figura 18.

Figura 17 – Diagrama de Cor-Magnitude, uma variante do diagrama HR, para as estrelas do aglomerado M55



Fonte: Astronomy Picture of The Day

Figura 18 – Trajetórias evolutivas de estrelas com metalicidade solar na sequência principal

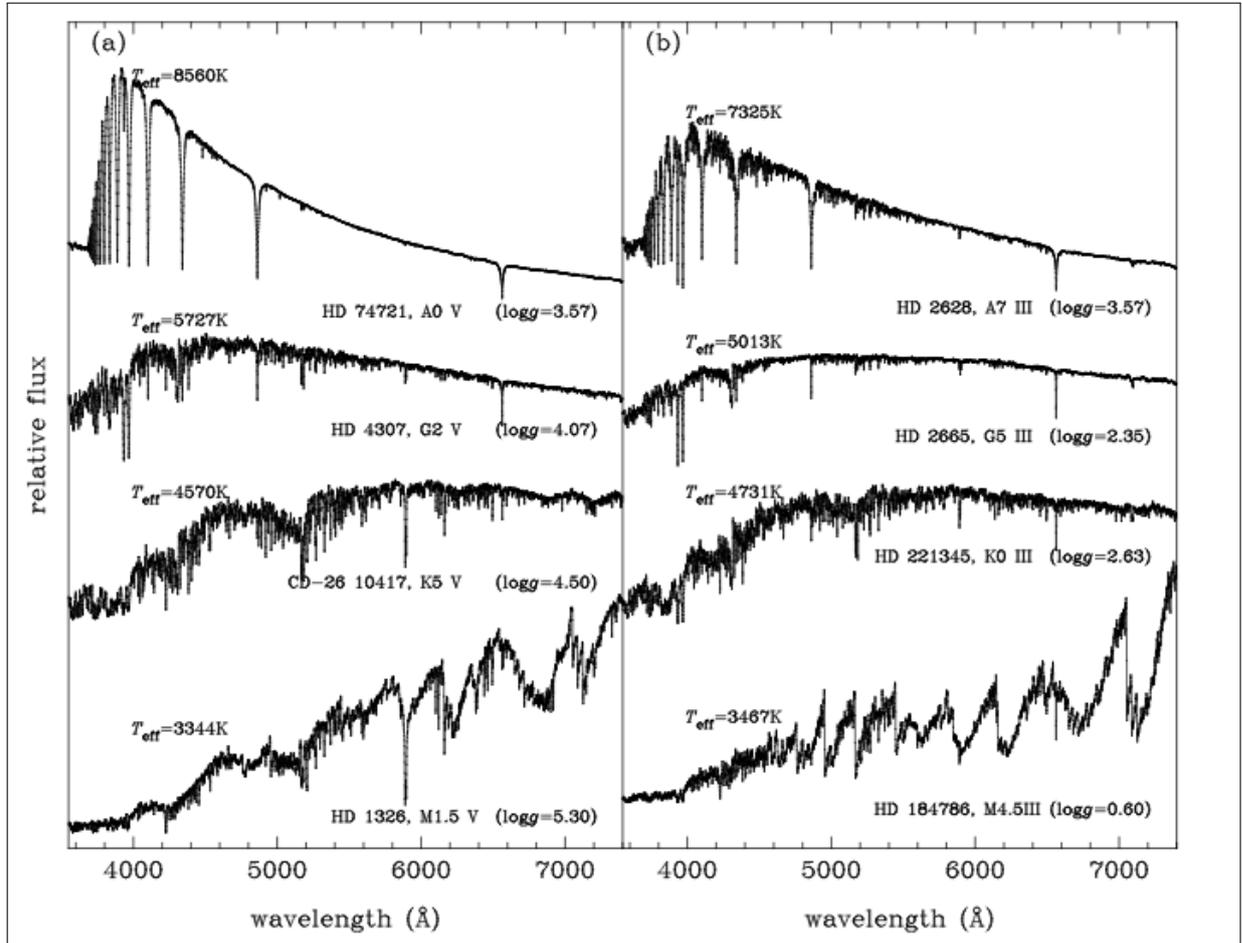


Fonte: (MO *et al.*, 2010)

As bibliotecas estelares são espectros de estrelas, como os da Figura 19, que podem ser sintéticos ou observados, que apresentam grande abrangência em massa, idade e metalicidade, com vários valores de temperatura e luminosidade, de forma que as estrelas sejam distribuídas

de por todo o diagrama HR.

Figura 19 – Sequências de tipos espectrais para uma amostra de anãs (a) e de estrelas gigantes (b) da biblioteca estelar MILES



Fonte: (SÁNCHEZ-BLÁZQUEZ *et al.*, 2006)

3.2 Síntese de Populações Estelares

Tomando os modelos de SSPs foram desenvolvidos códigos computacionais de síntese de populações estelares semiempírica, que encontram uma combinação de espectros de populações estelares que reproduzem o espectro de um dado objeto.

Existem dois métodos de síntese de populações estelares, a síntese de população empírica e a síntese de população evolutiva. Na síntese de populações estelares evolutiva é desenvolvido um modelo de sistema estelar que evolui com o tempo onde os observáveis são comparados aos observados no Sol. Nesse modelo as estrelas que são formadas recebem uma IMF e SFR. Os observáveis são calculados para cada distribuição temporal de estrelas nos termos das suas propriedades, como massa, metalicidade e idade, e esses cálculos são comparados aos

objetos de estudo. Se as medidas do modelo não concordam com o observado do objeto os parâmetros do modelo evolutivo são modificados (TINSLEY, 1968).

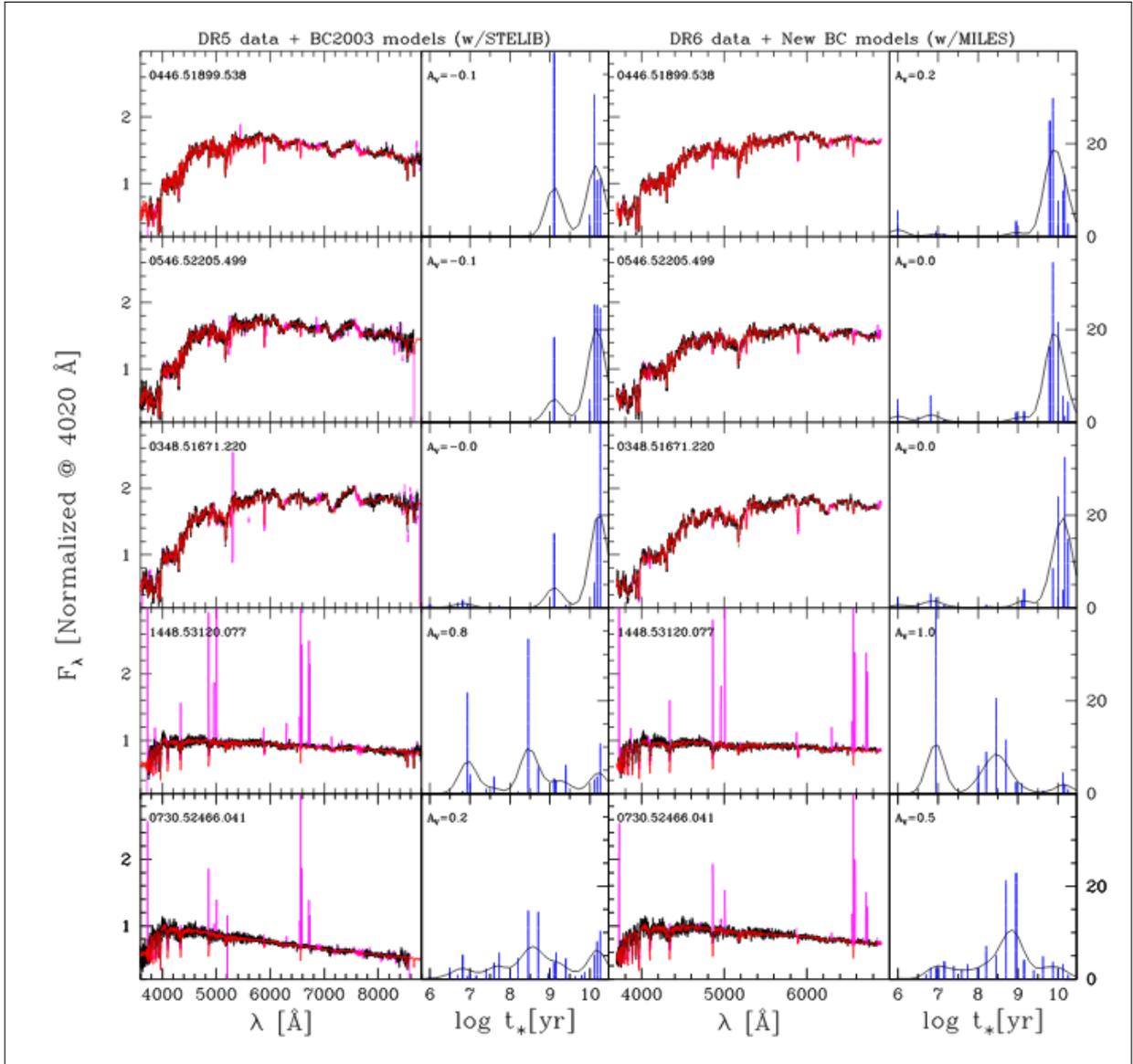
Na síntese de população semiempírica (MORGAN; MAYALL, 1957) utiliza o contínuo espectral estelar para determinar quais populações estelares estão presentes no sistema. Uma combinação linear de espectros de SSPs que reproduz o espectro observado do sistema é obtida para representar uma distribuição de populações estelares para um dado sistema. Nesse tipo de síntese é feita uma comparação entre os observáveis de uma galáxia e uma combinação de modelos de SSPs para obter uma combinação representativa de SSPs do objeto observado. Dessa forma, uma distribuição atual de metalicidades estelares atual e uma distribuição de idades é obtida, que relacionadas fornecem um histórico do enriquecimento químico para o sistema que foi analisado.

3.3 Starlight

O STARLIGHT (FERNANDES *et al.*, 2005) é um código de síntese de populações estelares, que mescla técnicas computacionais de síntese empírica com modelos de síntese de populações estelares evolutiva. O código encontra o melhor ajuste, M_λ , para um dado espectro, O_λ , em termos de uma combinação linear de N_* espectros de uma base de SSPs definida pelo usuário. A Figura 20 mostra exemplos de ajustes feitos com o STARLIGHT. Neste trabalho foram usados os modelos de populações estelares simples propostos por Bruzual e Charlot (BRUZUAL; CHARLOT, 2003).

Para executar a síntese de populações estelares com o STARLIGHT alguns arquivos de entrada são necessários. O espectro observado, que é o espectro que deve ser analisado. O arquivo de configuração, que determina os procedimentos que o código deve realizar. O arquivo de grade, que contém os parâmetros configurados pelo usuário. O arquivo da base, onde os espectros das SSPs utilizadas no ajuste são listados. O arquivo de máscara espectral, que indica ao código regiões do espectro que devem ser ignoradas. E os espectros de SSPs, que são os espectros utilizados pelo código para realizar o ajuste.

Figura 20 – Ajustes feitos com o STARLIGHT de cinco galáxias do SDSS



Fonte: (FERNANDES *et al.*, 2008)

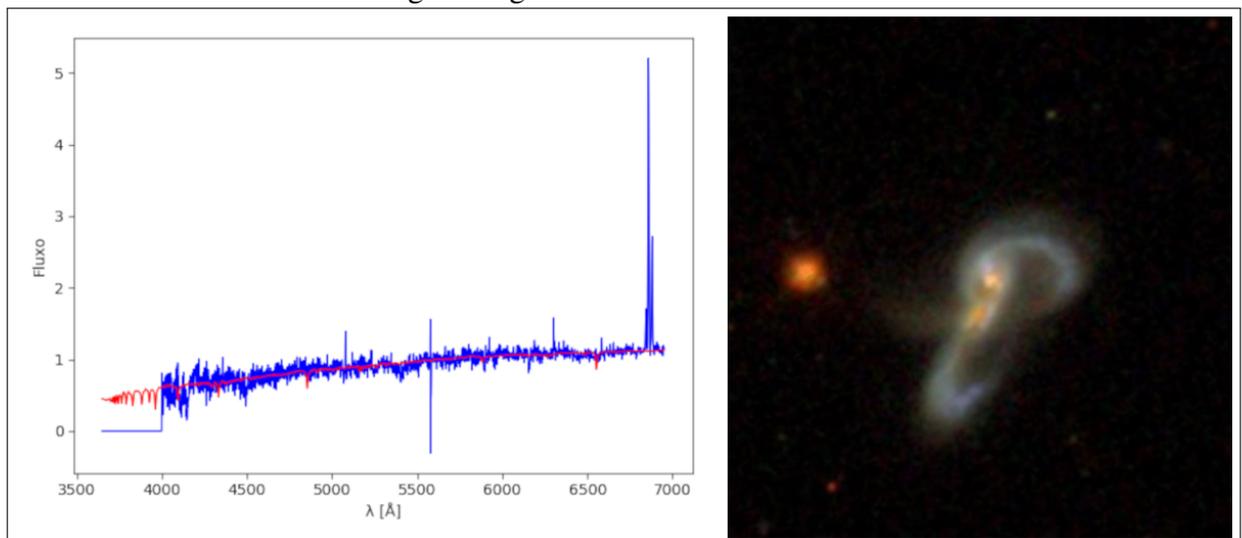
Os ajustes foram feitos usando modelos DR5 + BC03 com a biblioteca STELIB (esquerda) ou a versão DR6 com a biblioteca MILES (direita). Em preto e vermelho estão os espectros observados e sintéticos, com regiões mascaradas em magenta. Os histogramas mostram as % de frações de luz em 4020 rÅ da decomposição STARLIGHT em um conjunto comum de 25 idades \times 6 de metalicidades.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O código STARLIGHT foi usado com o objetivo de obter medidas das propriedades físicas de cada uma das galáxias da amostra (ver A). Como descrito na Seção 3.3, foram utilizados os modelos de SSPs de Bruzual & Charlot para obter medidas de idade e metalicidade das componentes estelares que formam os espectros das galáxias selecionadas.

Tomando os ajustes espectrais dos resultados obtidos do STARLIGHT é possível observar diversas características dos objetos selecionados. Os fluxos dos espectros das Figuras 21 e 22 apresentam diferentes intensidades quando regiões distintas são observadas. A Figura 21 exibe um contínuo razoavelmente definido apresentando apenas algumas linhas de emissão acentuadas. Linhas de emissão são observadas em galáxias que possuem uma componente gasosa dominante, que pode estar hospedando eventos de formação estelar de maneira mais acentuada, fazendo com que o gás na vizinhança se torne mais quente. Galáxias que apresentam essa característica são tipicamente do tipo starburst ou espirais. Em contrapartida, o espectro apresentado na 22 é predominantemente caracterizado por linhas de absorção. Dado que os objetos são galáxias que fogem da sequência principal de galáxias starforming, o espectro em questão, apesar de ser típico de uma galáxia elíptica, apresenta algumas linhas de emissão.

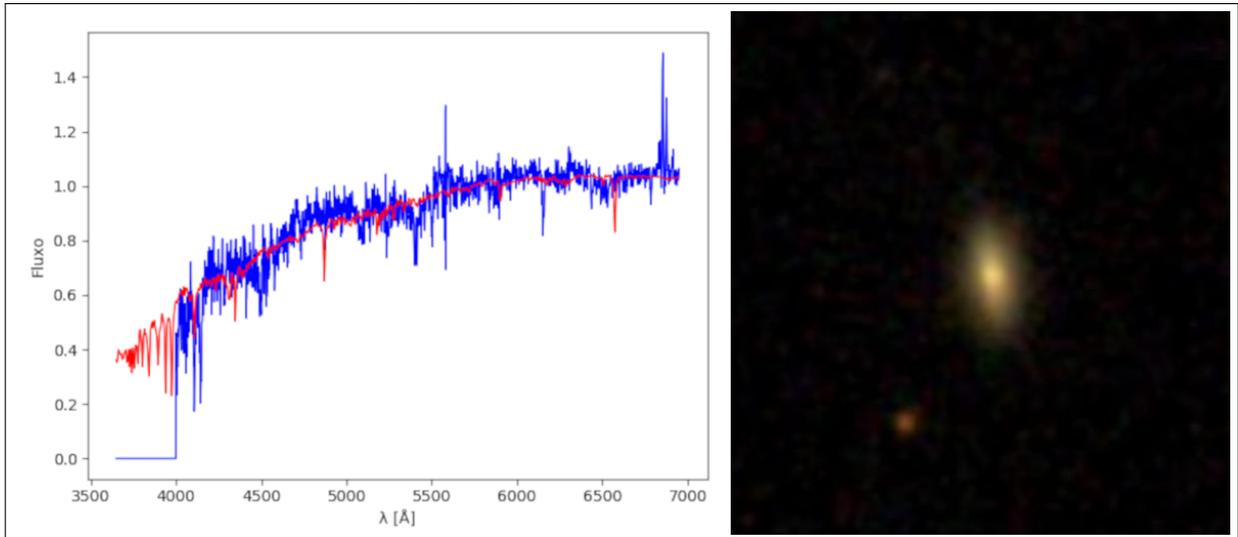
Figura 21 – Gráfico do ajuste feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 227.86595, Dec = 3.51696 e uma imagem da galáxia



À esquerda, o espectro observado da galáxia, em azul, em superposição ao ajuste feito com o código STARLIGHT, em vermelho. À direita uma imagem da galáxia obtida do SDSS.

As propriedades de idade e metalicidade de todas as galáxias da amostra foram obtidas aplicando a metodologia de síntese de populações estelares, o que permitiu observar

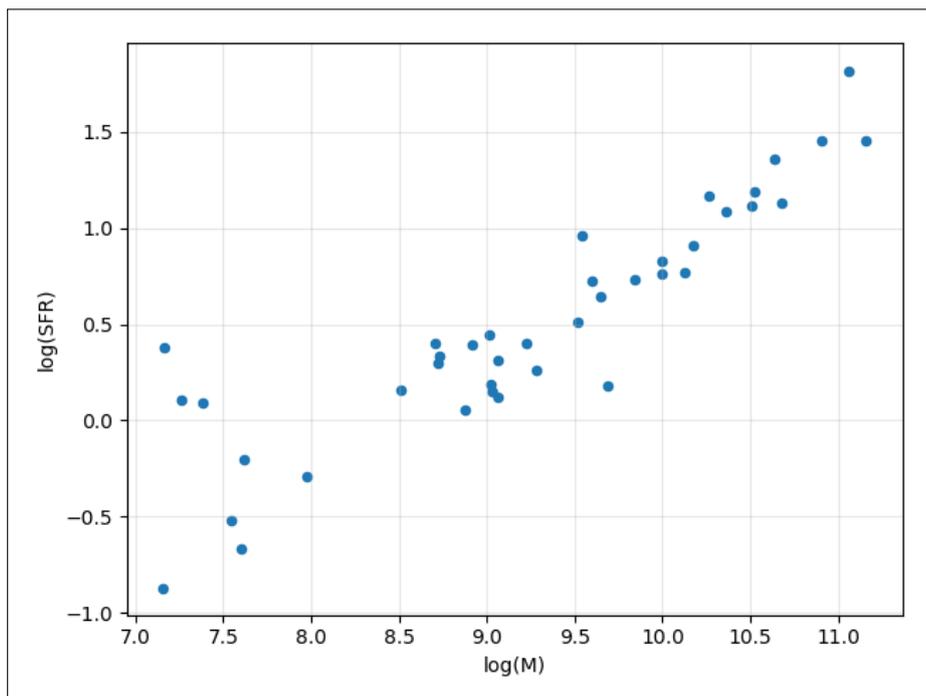
Figura 22 – Gráfico do ajuste feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 150.42, Dec = 3.00500 e uma imagem da galáxia



À esquerda, o espectro observado da galáxia, em azul, em superposição ao ajuste feito com o código STARLIGHT, em vermelho. À direita uma imagem da galáxia obtida do SDSS.

como essas propriedades podem estar relacionadas ou não, considerando o tipo morfológico das galáxias analisadas. A SFR e a massa estelar são duas propriedades obtidas por meio dessa técnica. O gráfico da Figura 23 apresenta a relação existente entre a SFR e a massa, que nos mostra essencialmente que galáxias mais massivas possuem uma maior atividade de formação estelar.

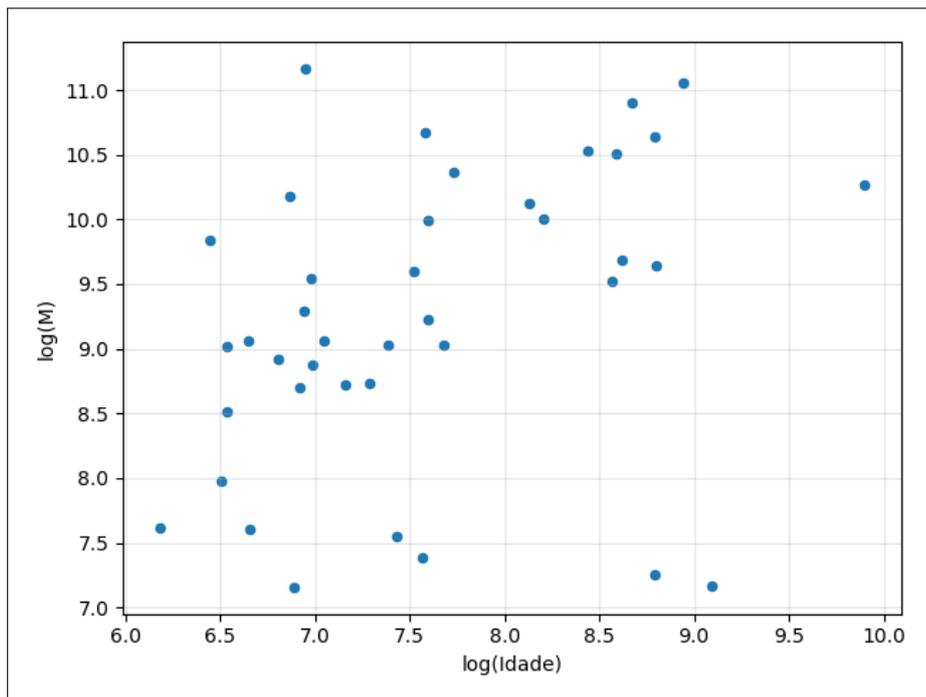
Figura 23 – Gráfico da relação entre SFR e massa das 40 galáxias selecionadas



Galáxias starburst apresentam uma componente gasosa e encontram-se sofrendo processos de merger, o que pode manter o nascimento de estrelas por bilhões de anos. As galáxias estudadas neste trabalho são do tipo starburst que se localizam acima da sequência principal de galáxias starforming. Entretanto, quando observamos galáxias mais distantes, os valores dessa sequência principal são elevados, fazendo com que galáxias que são do tipo starburst em baixo redshift, possam ser na verdade galáxias da sequência principal se observamos objetos semelhantes em maiores redshifts.

Uma relação não tão clara, mas que pode ser verificada a partir da amostra de galáxias starbursts estudadas, é a apresentada no gráfico da Figura 24 que ocorre entre a massa e a idade desses objetos. É de certa forma esperado que galáxias mais velhas, as que em média já transformaram todo o gás em estrelas, sejam mais massivas que galáxias mais jovens ao considerarmos que a componente gasosa desses objetos é transformada em estrelas.

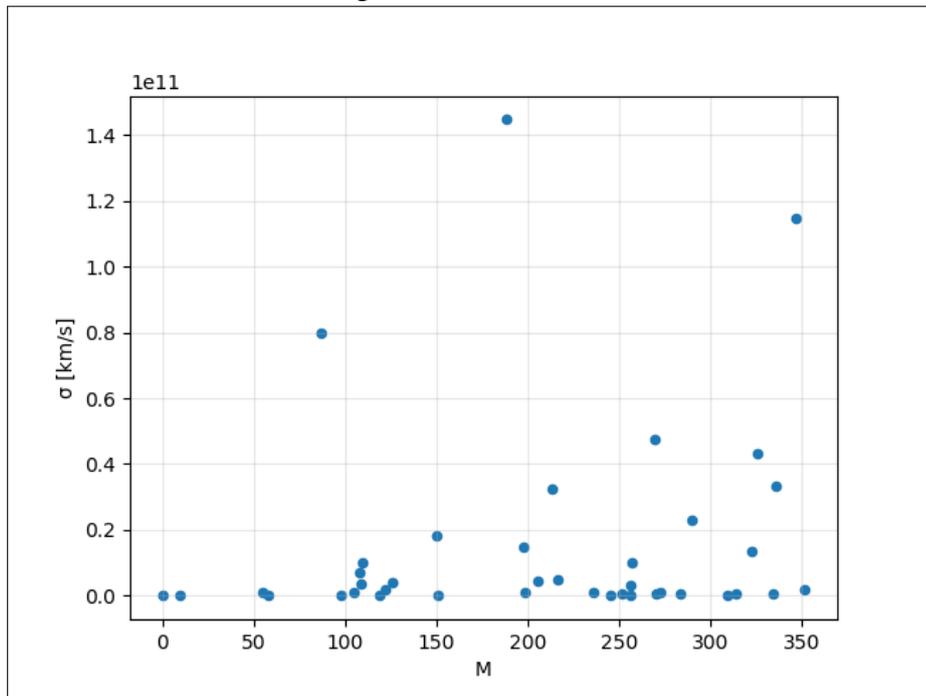
Figura 24 – Gráfico da relação entre massa e idade das 40 galáxias selecionadas



Através da técnica de síntese de populações estelares também é possível obter componentes cinemáticas das galáxias. Dos estudos de dinâmica de galáxias (MALACARNE, 2002), galáxias elípticas são suportadas por anisotropias na dispersão de velocidades, isto é, as estrelas no interior desses objetos apresentam movimentos aleatórios com alta dispersão de velocidade. Porém, galáxias espirais não possuem grandes dispersões de velocidades, fazendo

com que a sua dinâmica seja dominada por rotação. O gráfico da Figura 25 apresenta a relação entre as massas estelares e as dispersões de velocidades das galáxias estudadas. Desconsiderando os pontos isolados, é claro que as galáxias da amostra apresentam baixos valores de dispersão de velocidade, o que é um resultado esperado ao considerar que a amostra é composta por galáxias que possuem componentes de disco que são sustentados por rotação, logo nesses casos valores altos de dispersão de velocidades não eram esperados.

Figura 25 – Gráfico da relação entre dispersão de velocidades (σ) e massa das 40 galáxias selecionadas



5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho uma amostra de galáxias starburst obtidas da base de dados pública do Sloan Digital Sky Survey foi selecionada com o objetivo de análise de suas populações estelares. A princípio, uma amostra contendo aproximadamente 10000 galáxias foi selecionada, onde 40 objetos que apresentaram um desvio de 2dex da sequência principal foram escolhidos.

Utilizando o código de síntese de populações estelares STARLIGHT para cada uma das 40 galáxias foi possível obter o ajuste espectral e assim analisar como suas propriedades estelares são correlacionadas. A técnica de ajuste espectral mostrou-se bastante eficaz pois trata-se de uma técnica que consome pouco tempo computacional quando consideramos as informações que podemos obter em um único ajuste para um dado espectro.

Baseando-se nesses ajustes podemos concluir que galáxias starburst apresentam majoritariamente componentes gasosas proeminentes (Ver Figura 12) e conseqüentemente apresentam populações estelares jovens. Essas populações estelares jovens apresentam idades típicas que podem variar entre 5 a 9 bilhões de anos. Outra componente importante nessa amostra de galáxias é além de apresentarem uma componente gasosa dominante, algumas delas também apresentam sinais claros de merger. O fenômeno de merger pode contribuir de maneira significativa no aumento da SFR e, por consequência, na manutenção de populações estelares jovens (BECKMAN *et al.*, 2008).

Como perspectivas, temos a intenção de expandir esse estudo para uma amostra maior de objetos, não somente analisando populações estelares em galáxias com formação estelar intensa mas também em objetos que tipicamente não formam estrelas como galáxias elípticas, por exemplo.

Uma vez que a base do SDSS cobre uma grande área do céu, é uma ideia relevante verificar como essas populações estelares variam para galáxias starburst presentes em outros intervalos de redshift dentro dos limites observacionais do survey.

REFERÊNCIAS

- ALPHER, R. A.; BETHE, H.; GAMOW, G. The Origin of Chemical Elements. **Physical Review**, v. 73, p. 803–804, abr. 1948.
- BAADE, W. The resolution of messier 32, ngc 205, and the central region of the andromeda nebula. **The Astrophysical Journal**, v. 100, p. 137, 1944.
- BAUGH, C. M. A primer on hierarchical galaxy formation: the semi-analytical approach. **Reports on Progress in Physics**, IOP Publishing, v. 69, n. 12, p. 3101, 2006.
- BECKMAN, J.; CARRETERO, C.; VAZDEKIS, A. The role of mergers in galaxy evolution. **Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics Supplement**, v. 8, p. 77–83, 2008.
- BRUZUAL, G.; CHARLOT, S. Stellar population synthesis at the resolution of 2003. v. 344, p. 1000–1028, out. 2003.
- DA SILVA, L. S. **Síntese de populações estelares nas galáxias NGC128, NGC5796 e NGC6851: distribuições e gradientes radiais de idade e metalicidade**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2016.
- EGGEN, O.; LYNDEN-BELL, D.; SANDAGE, A. Evidence from the motions of old stars that the galaxy collapsed. **The Astrophysical Journal**, v. 136, p. 748, 1962.
- FERNANDES, R. C.; MATEUS, A.; SODRÉ, L.; STASIŃSKA, G.; GOMES, J. M. Semi-empirical analysis of sloan digital sky survey galaxies—i. spectral synthesis method. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, The Royal Astronomical Society, v. 358, n. 2, p. 363–378, 2005.
- FERNANDES, R. C.; SCHOENELL, W.; GOMES, J.; ASARI, N. V.; SCHLICKMANN, M.; MATEUS, A.; STASINSKA, G.; SODRE, L.; TORRES-PAPAQUI, J. *et al.* The star formation histories of galaxies: A tour through the starlight-sdss database. **arXiv preprint arXiv:0802.0849**, 2008.
- GALILEI, G.; HELDEN, A. V. Book. **Sidereus nuncius, or, The Sidereal messenger / Galileo Galilei ; translated with introduction, conclusion, and notes by Albert van Helden**. University of Chicago Press Chicago, 1989. ISBN 0226279030. Disponível em: <<http://www.loc.gov/catdir/toc/uchi051/88025179.html>>.
- GUNN, J. E.; SIEGMUND, W. A.; MANNERY, E. J.; OWEN, R. E.; HULL, C. L.; LEGER, R. F.; CAREY, L. N.; KNAPP, G. R.; YORK, D. G.; BOROSKI, W. N. *et al.* The 2.5 m telescope of the sloan digital sky survey. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 131, n. 4, p. 2332, 2006.
- HERSCHEL, W. On the construction of the heavens [electronic resource] : / by william herschel, esq. f.r.s. read at the royal society, february 3, 1785. printed by J. Nichols London, p. [2],54 pages, plate ;, 1785.
- HERSCHEL, W. Catalogue of One Thousand New Nebulae and Clusters of Stars. By William Herschel, LL.D. F. R. S. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I**, v. 76, p. 457–499, 1786.

HETHERINGTON, N. S. The Shapley-Curtis Debate. **Leaflet of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 10, p. 313–320, abr. 1970.

HUBBLE, E. Cepheids in spiral nebulae. **The Observatory**, v. 48, p. 139–142, maio 1925.

KANT, I. **Universal Natural History and Theory of the Heavens: Or, An Essay on the Constitution and the Mechanical Origins of the Entire Structure of the Universe**. [S.l.]: Arlington: Richer Resources. Original work published, 1755.

LACEY, C.; COLE, S. Merger rates in hierarchical models of galaxy formation. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press Oxford, UK, v. 262, n. 3, p. 627–649, 1993.

LEAVITT, H. S.; PICKERING, E. C. Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud. **Harvard College Observatory Circular**, v. 173, p. 1–3, mar. 1912.

LUMEN LEARNING ASTRONOMY. 2019. Disponível em: <<https://courses.lumenlearning.com/astronomy/chapter/the-formation-of-the-galaxy/>>. Acesso em: 26 mar. 2019.

MALACARNE, M. **Populações estelares em galáxias elípticas: cinemática e indicadores de metalicidade e idade**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2002.

MO, H.; VAN DEN BOSCH, F.; WHITE, S. **Galaxy Formation and Evolution**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-0-511-72962-1.

MORGAN, W. W.; MAYALL, N. A spectral classification of galaxies. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 69, p. 291, 1957.

MURDIN, P. **Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics**. Institute of Physics Pub., 2001. (Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics, v. 2). ISBN 9781561592685. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=QJofxAJoJIIC>>.

PELETIER, R. A critical view on stellar population synthesis. In: **International Workshop on Stellar Spectral Libraries**. [S.l.: s.n.], 2014. v. 11, p. 107–116.

PENZIAS, A. A.; WILSON, R. W. A measurement of excess antenna temperature at 4080 mc/s. **The Astrophysical Journal**, v. 142, p. 419–421, 1965.

REIS, R. R. R.; SOARES-SANTOS, M.; ANNIS, J.; DODELSON, S.; HAO, J.; JOHNSTON, D.; KUBO, J.; LIN, H.; SEO, H.-J.; SIMET, M. THE SLOAN DIGITAL SKY SURVEY CO-ADD: A GALAXY PHOTOMETRIC REDSHIFT CATALOG. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 747, n. 1, p. 59, feb 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F0004-637x%2F747%2F1%2F59>>.

SÁNCHEZ-BLÁZQUEZ, P.; PELETIER, R. F.; JIMÉNEZ-VICENTE, J.; CARDIEL, N.; CENARRO, A. J.; FALCÓN-BARROSO, J.; GORGAS, J.; SELAM, S.; VAZDEKIS, A. Medium-resolution Isaac Newton Telescope library of empirical spectra. v. 371, p. 703–718, set. 2006.

SCHNEIDER, P. **Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction**. [S.l.]: Springer, 2006. ISBN 9783540331742.

TINSLEY, B. M. Evolution of the stars and gas in galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 151, p. 547, 1968.

WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE. 2018. Disponível em: <<http://map.gsfc.nasa.gov/media/101082/index.html>>. Acesso em: 29 out. 2018.

APÊNDICE A – AJUSTES ESPECTRAIS PARA AS GALÁXIAS DA AMOSTRA

A síntese espectral feita utilizando o código STARLIGHT, foram obtidas propriedades de idade e metalicidade das galáxias da amostra, como também componentes cinemáticas desses objetos.

As figuras a seguir mostram o ajuste espectral para cada uma das 40 galáxias selecionadas, onde o espectro observado está representado em azul e o espectro sintético obtido do STARLIGHT está em vermelho, juntamente aos espectros há uma imagem da galáxia correspondente.

Figura 26 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 227.865949857258 , Dec = 3.51697651442479

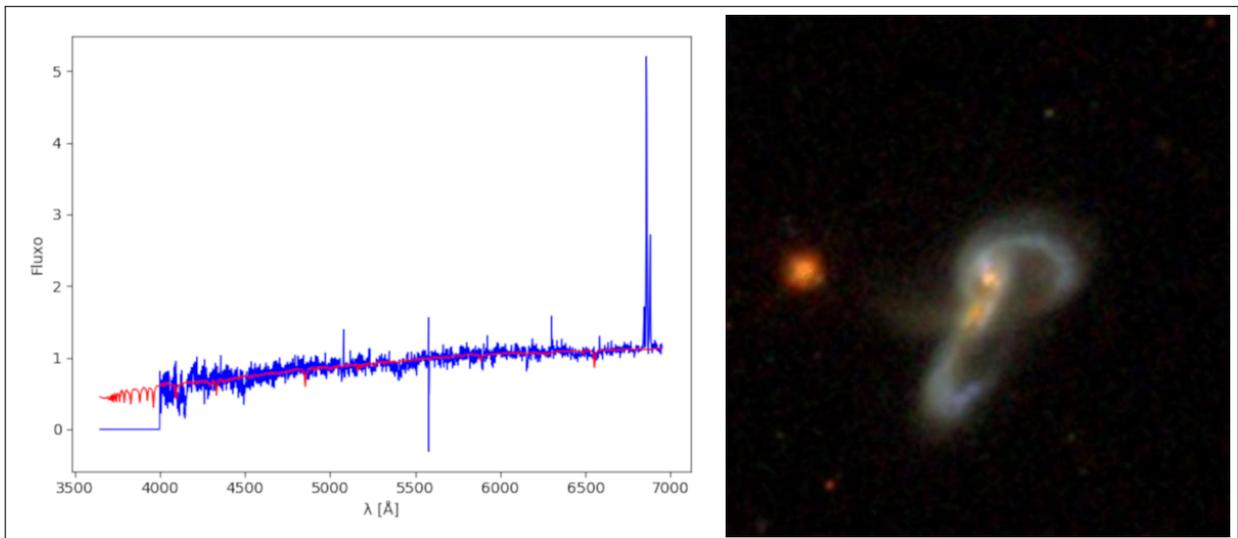


Figura 27 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 21.8717969156986, Dec = -8.55427250884549

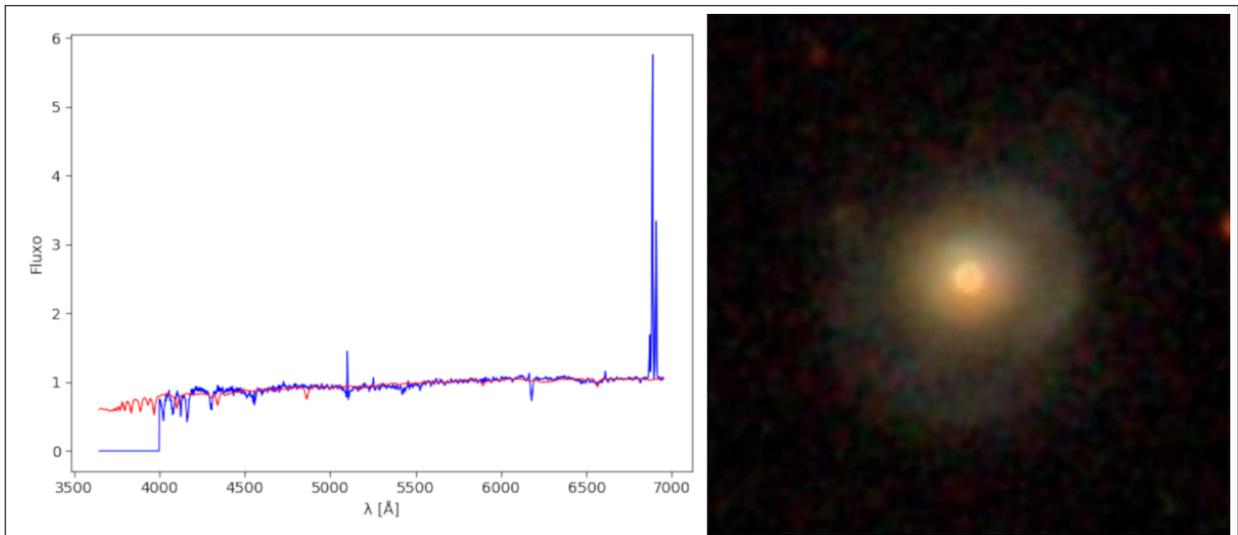


Figura 28 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 130.310018382122, Dec = 52.1957359463522

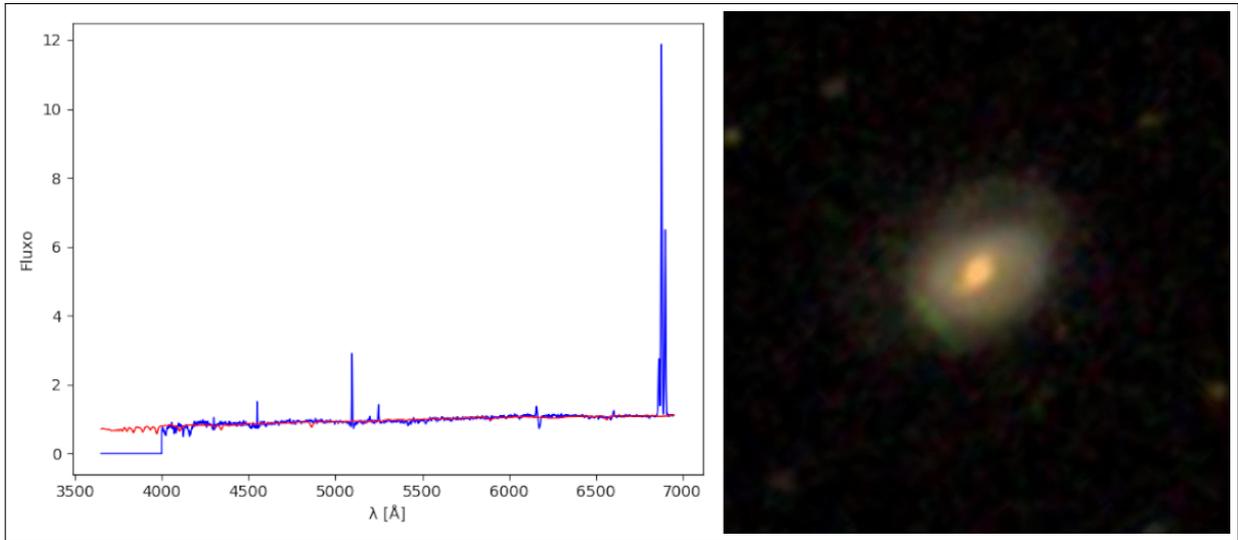


Figura 29 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 170.896663957686, Dec = -1.56565227516413

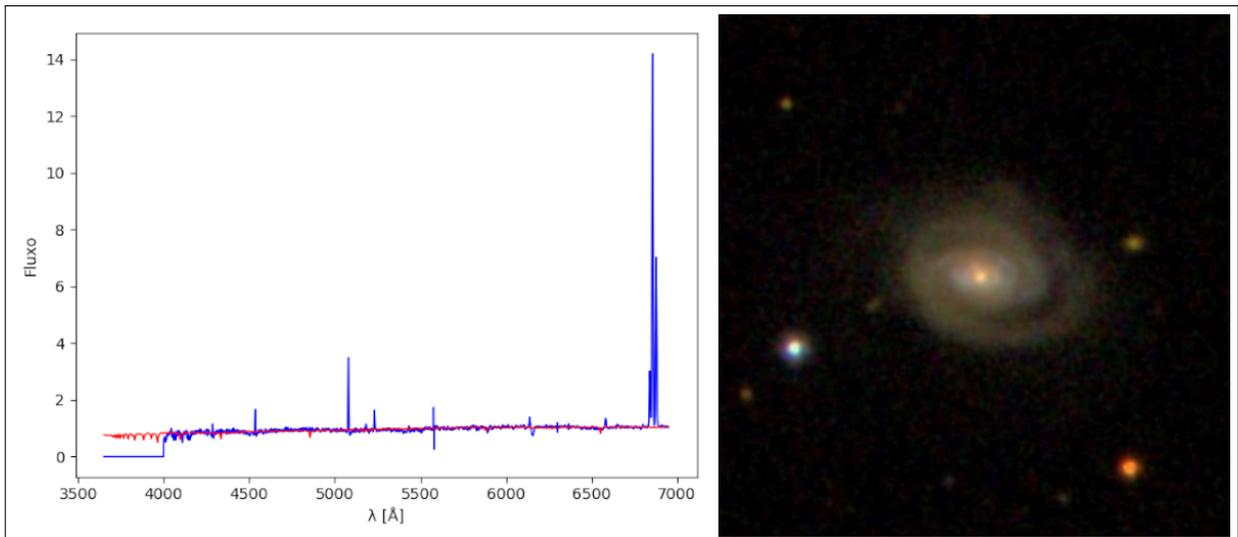


Figura 30 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 11.8307994998572, Dec = 14.7034818523249

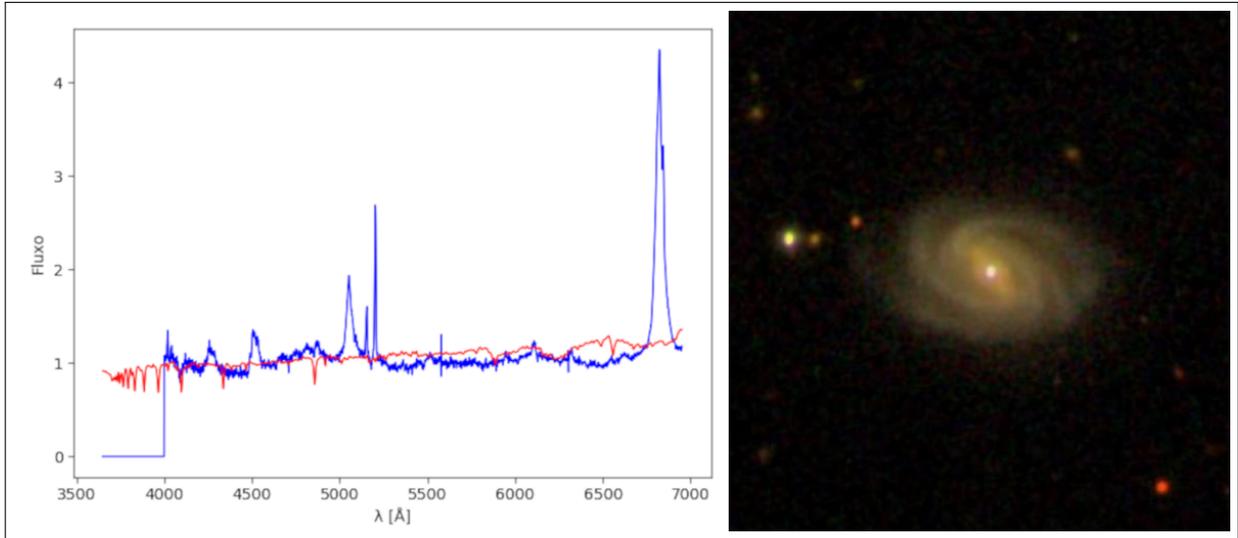


Figura 31 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 150.427984236227, Dec = 3.0049945646724

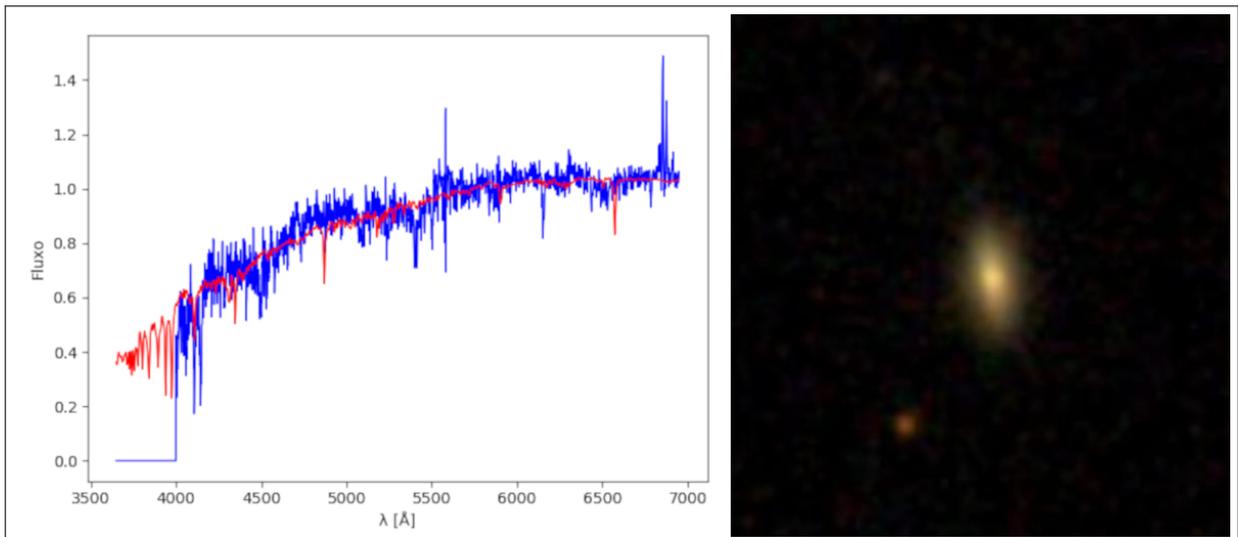


Figura 32 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 169.791682048991, Dec = 66.2164125693813

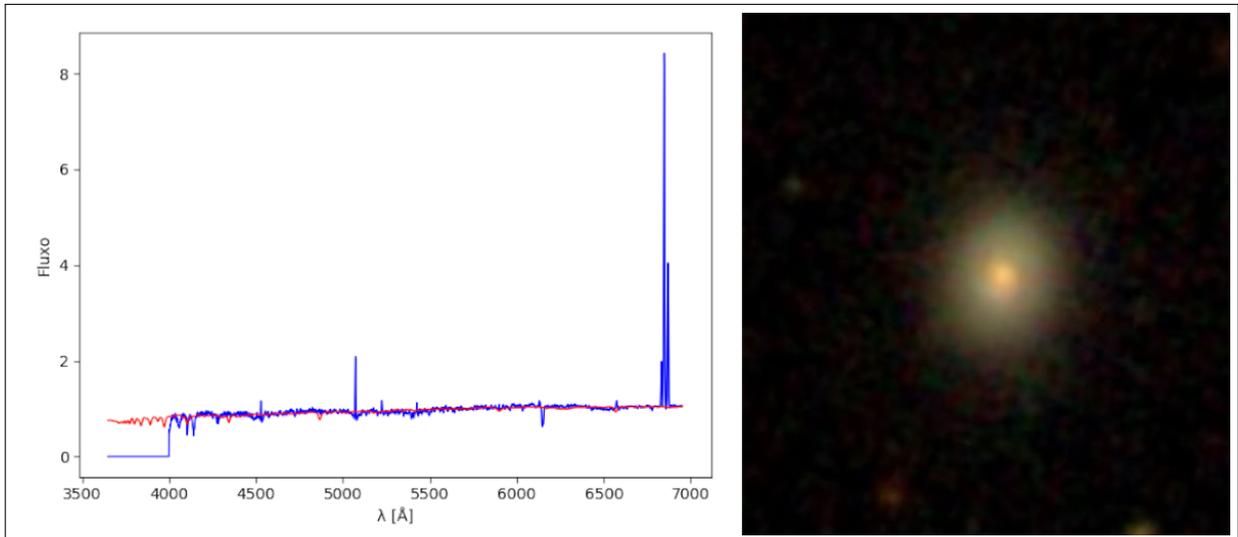


Figura 33 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 237.881873160154, Dec = 52.0948209277313

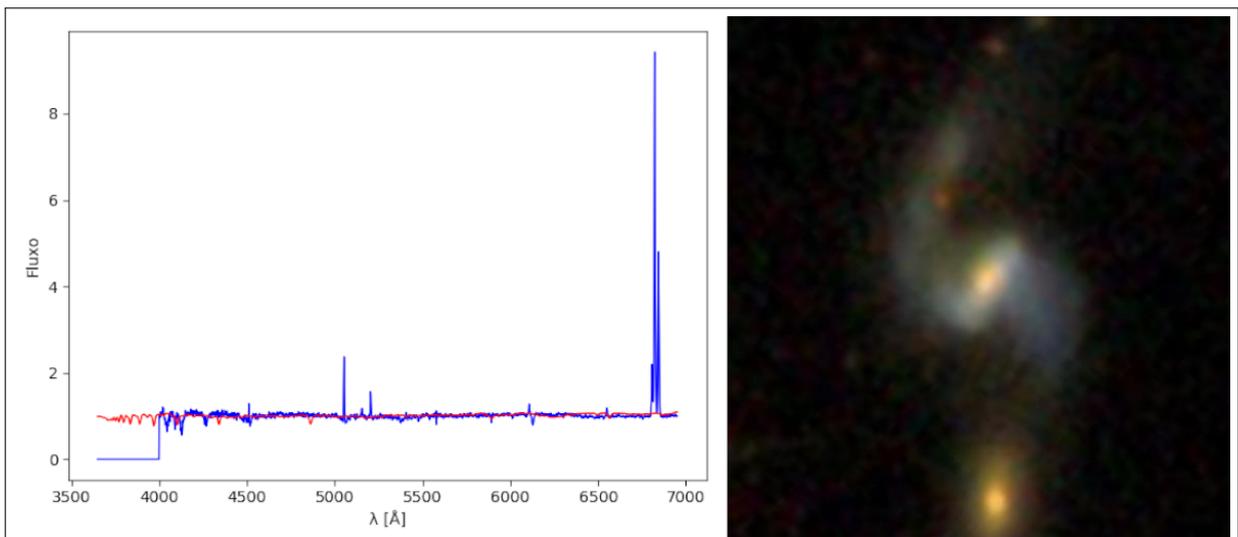


Figura 34 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 151.706164133523, Dec = 1.457306987633

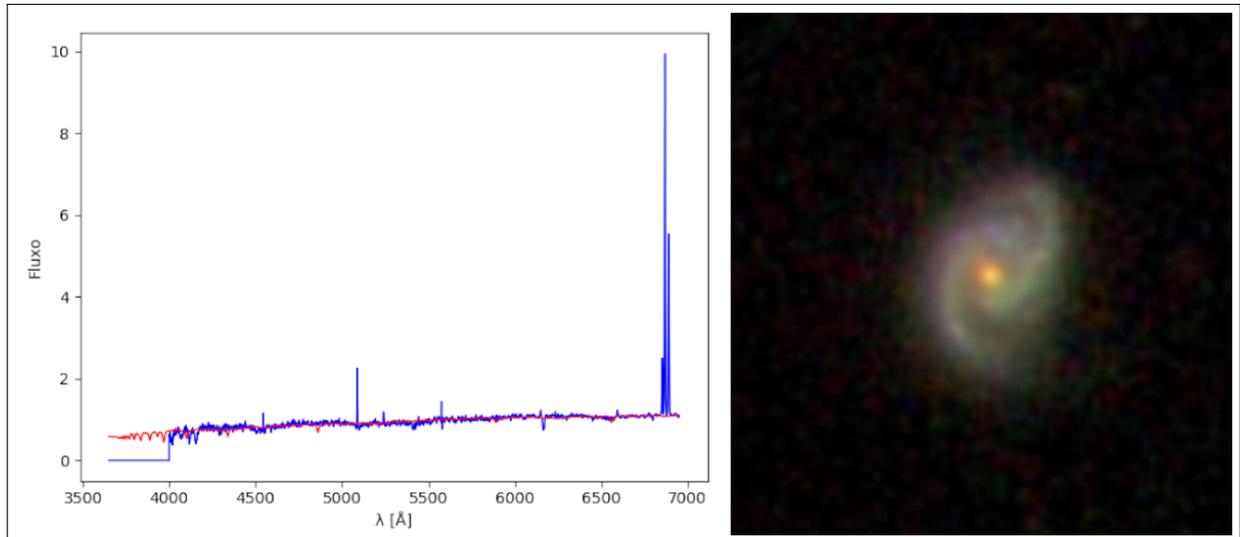


Figura 35 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 210.037501403909, Dec = 4.08078498543936

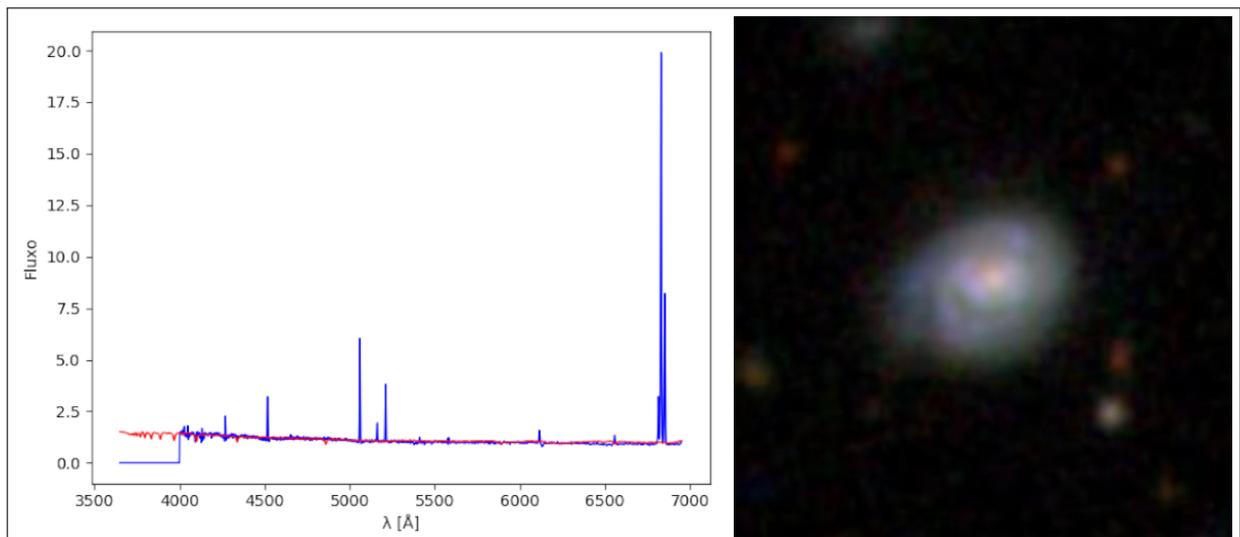


Figura 36 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 180.309816862222, Dec = -3.6780965188156

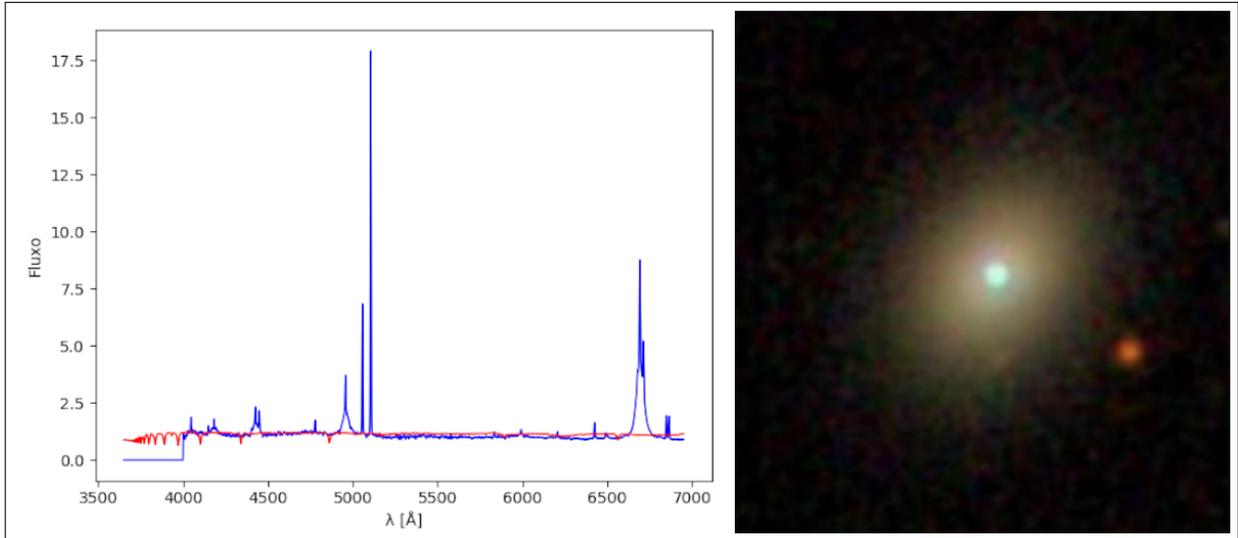


Figura 37 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 213.477919712364, Dec = 1.73103875839387

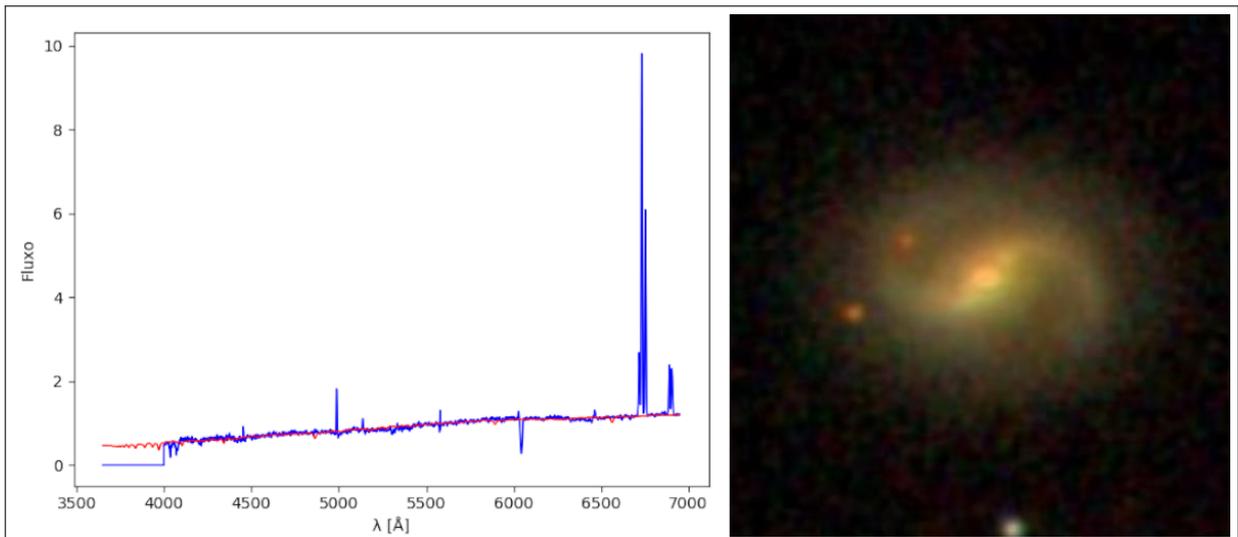


Figura 38 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 161.561999478118, Dec = 0.0502550947251813

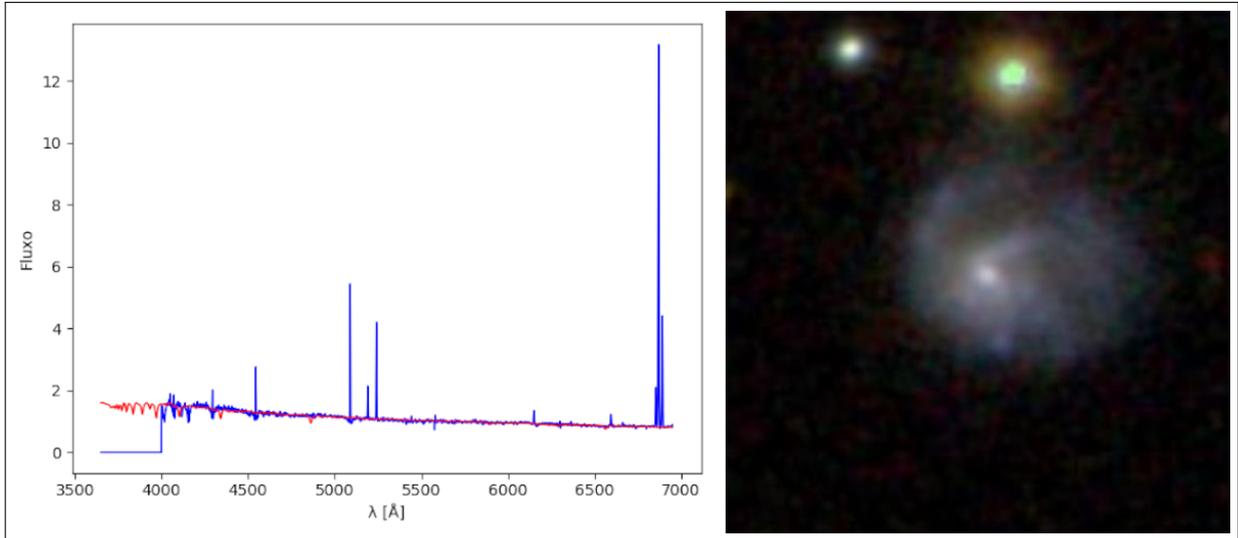


Figura 39 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 228.342068544747, Dec = 0.806493518359825

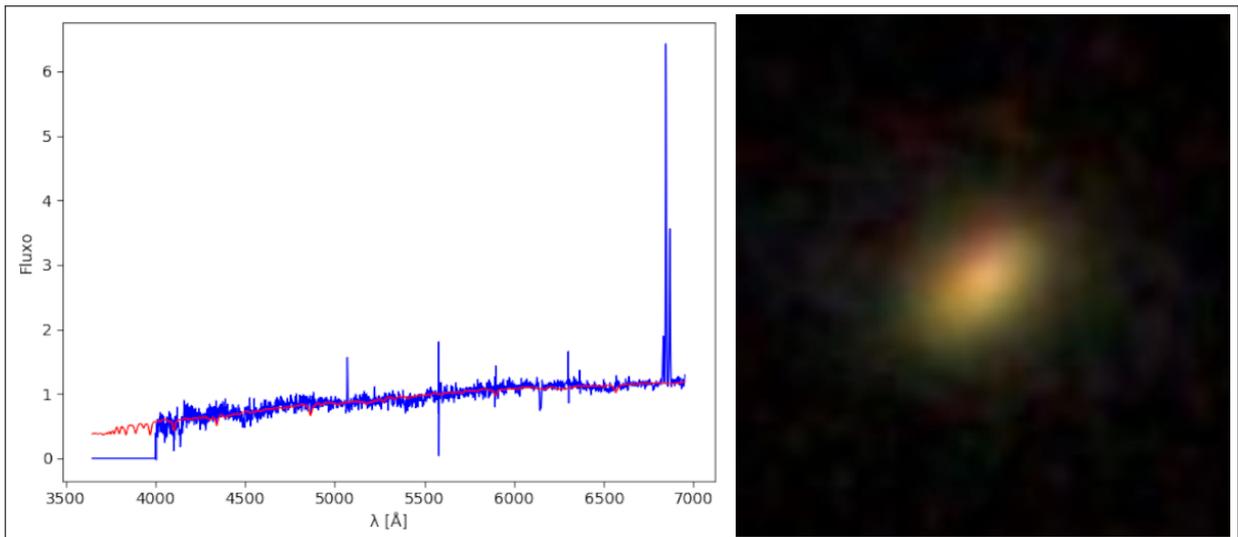


Figura 40 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 232.738865379669, Dec = 54.6918326020705

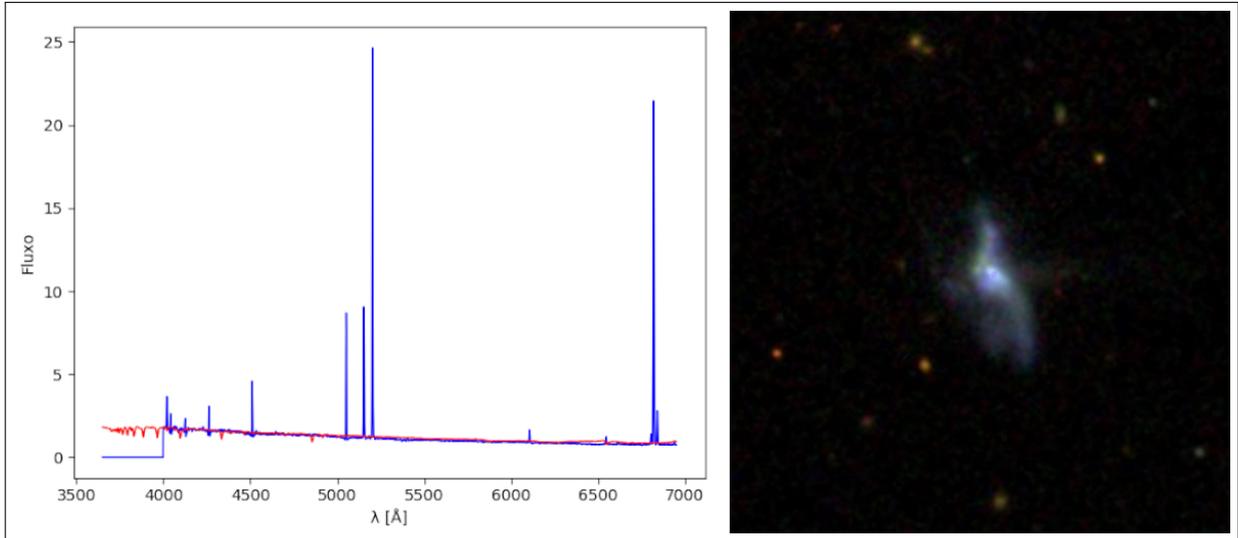


Figura 41 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 239.731994668154, Dec = 239.731994668154

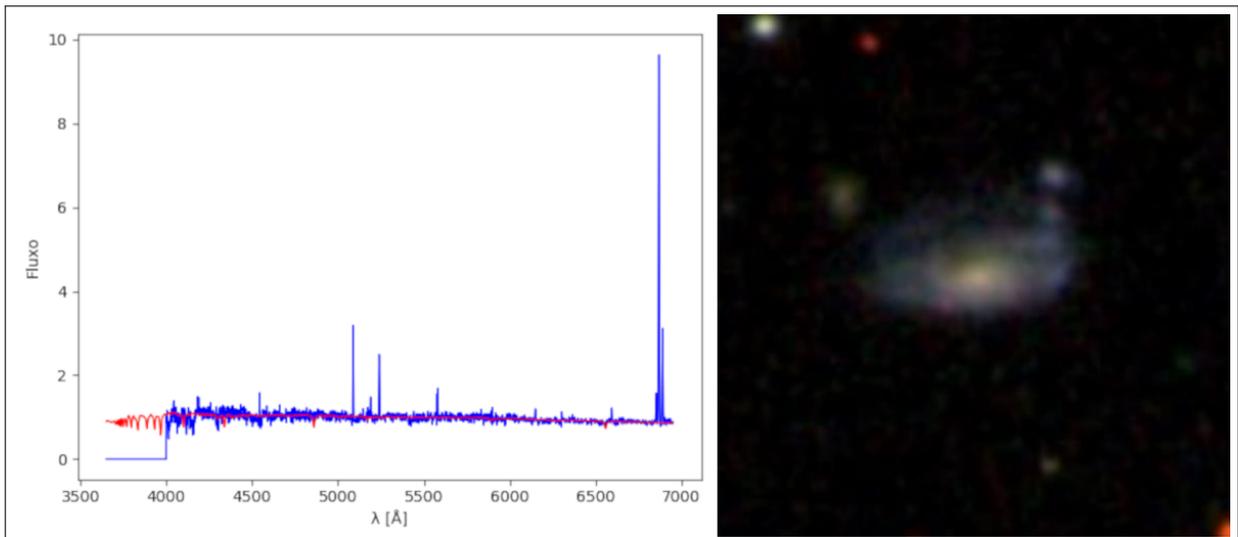


Figura 42 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 169.232622407561, Dec = 64.038741322593

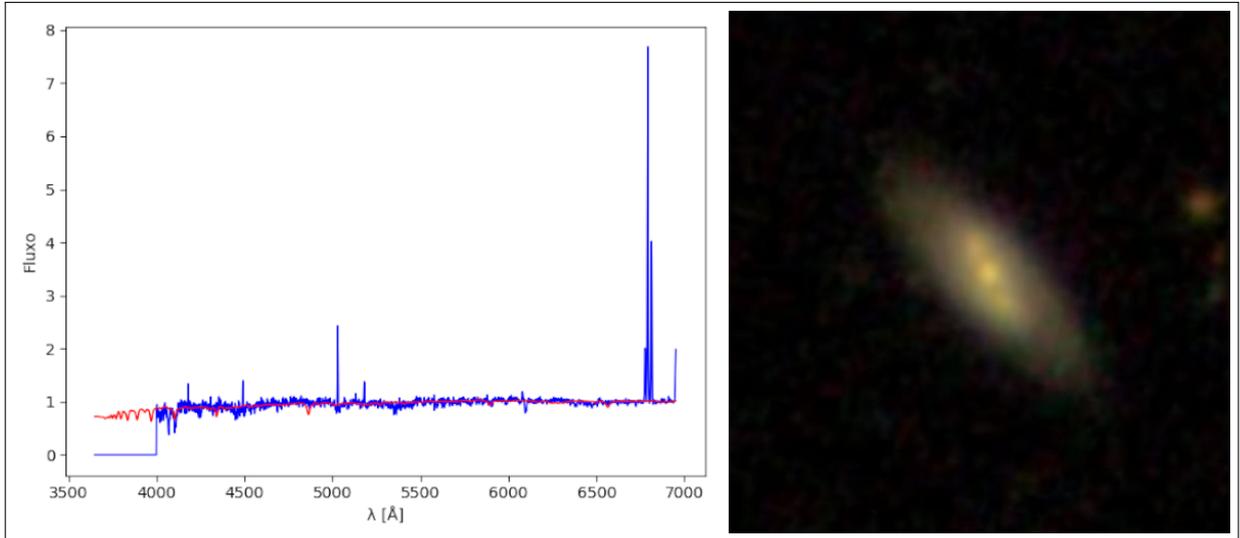


Figura 43 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 196.398494052729, Dec = 5.19677603560923

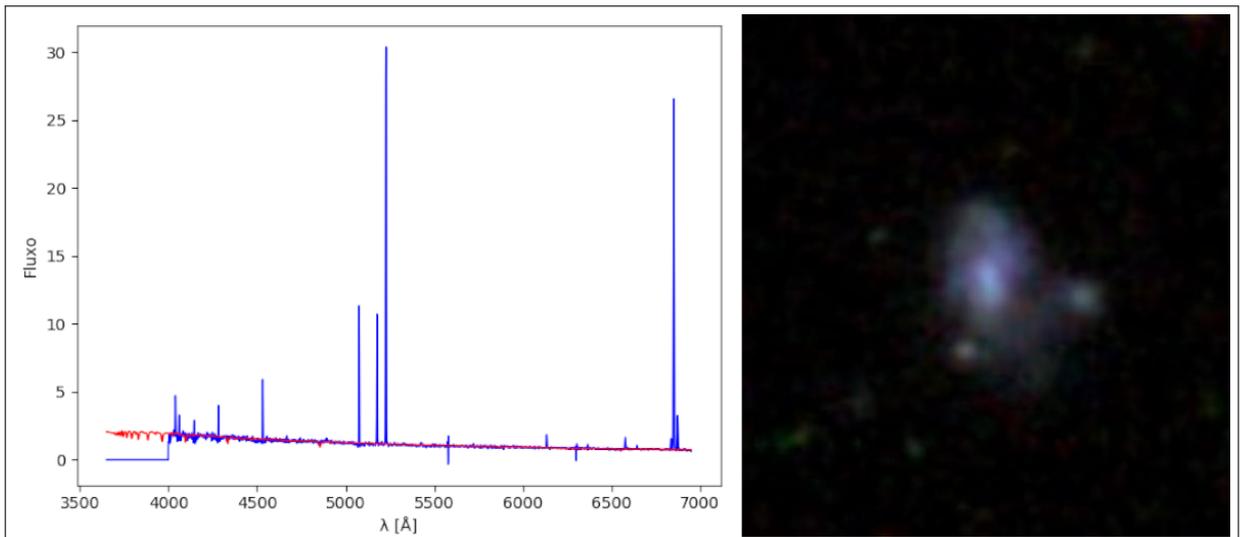


Figura 44 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 168.234305640224, Dec = -0.909841513179836

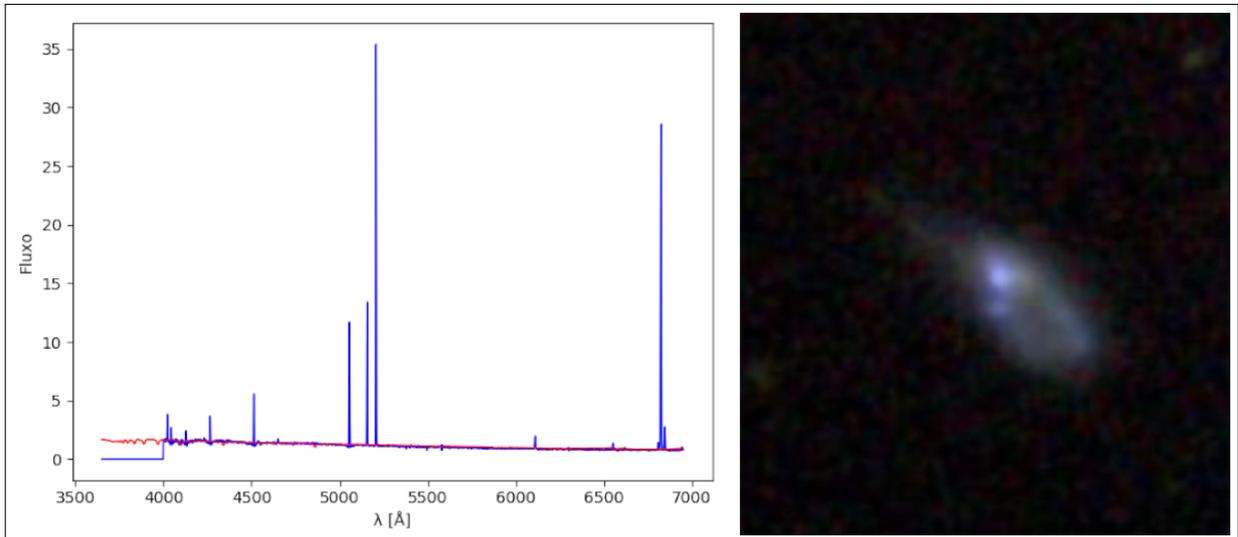


Figura 45 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 236.569315548837, Dec = 2.41337766241273

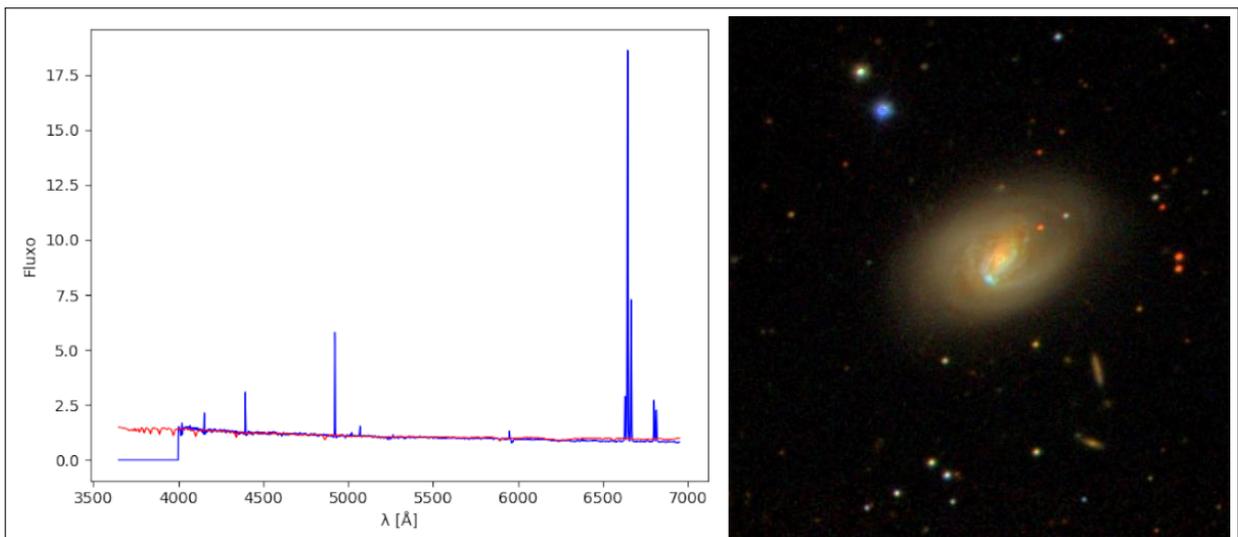


Figura 46 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 195.850719300151, Dec = -2.17970607464299

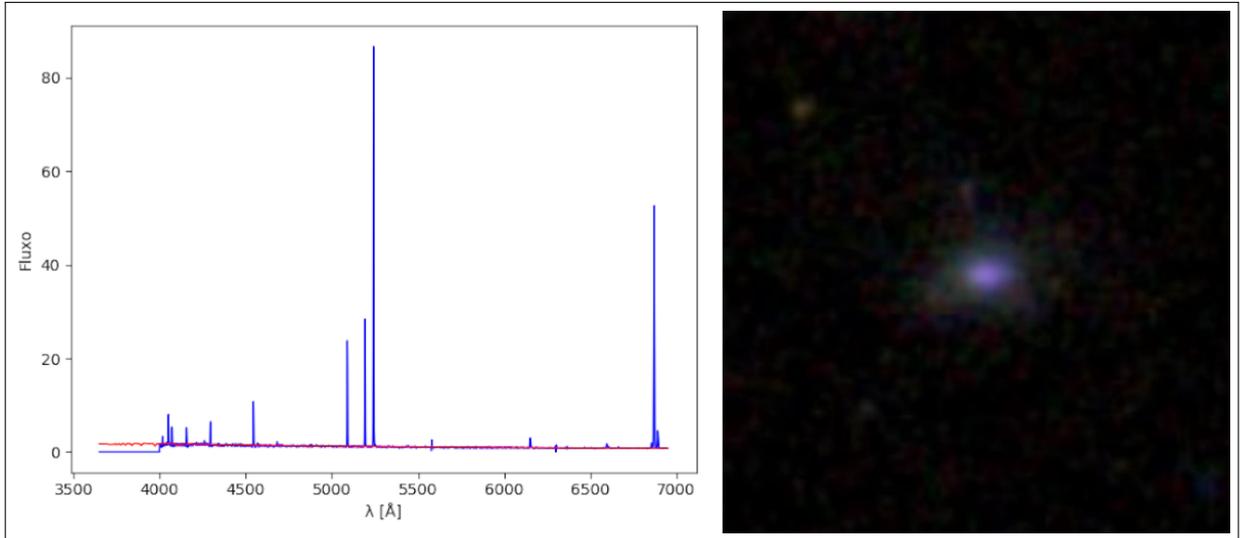


Figura 47 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 141.124269684834, Dec = 51.7169805652747

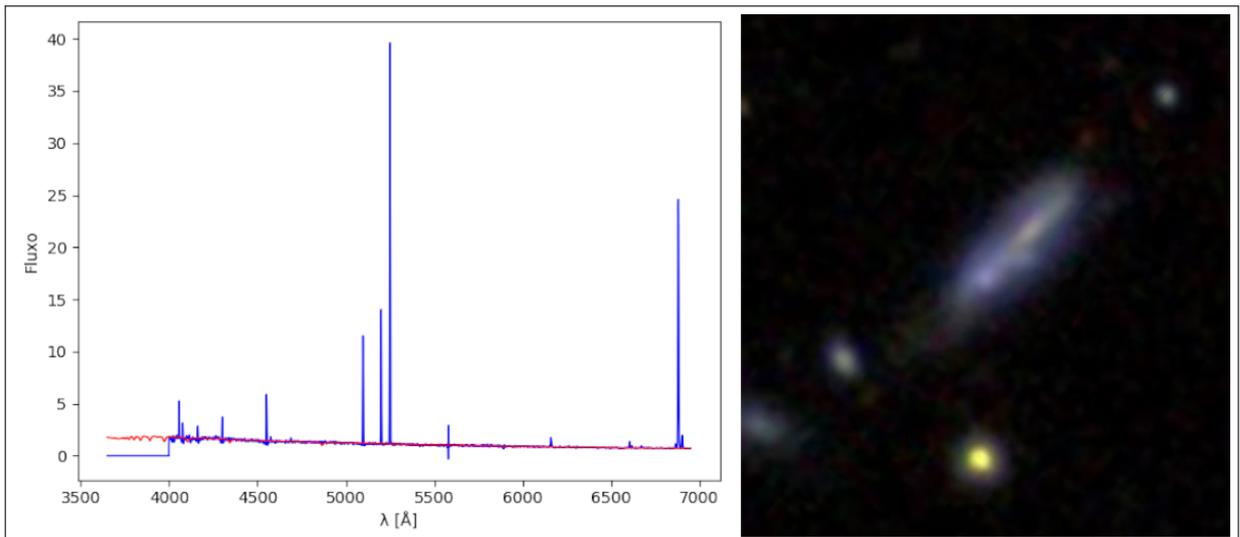


Figura 48 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 153.179062301702, Dec = 61.5507826322707

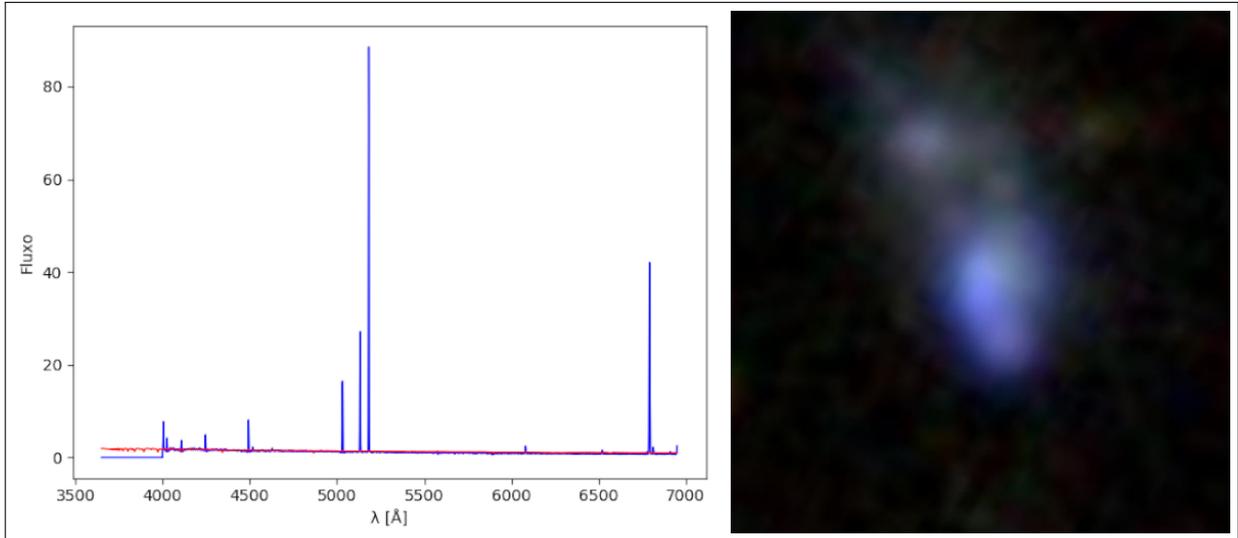


Figura 49 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 318.862827696552, Dec = -7.99760858853458

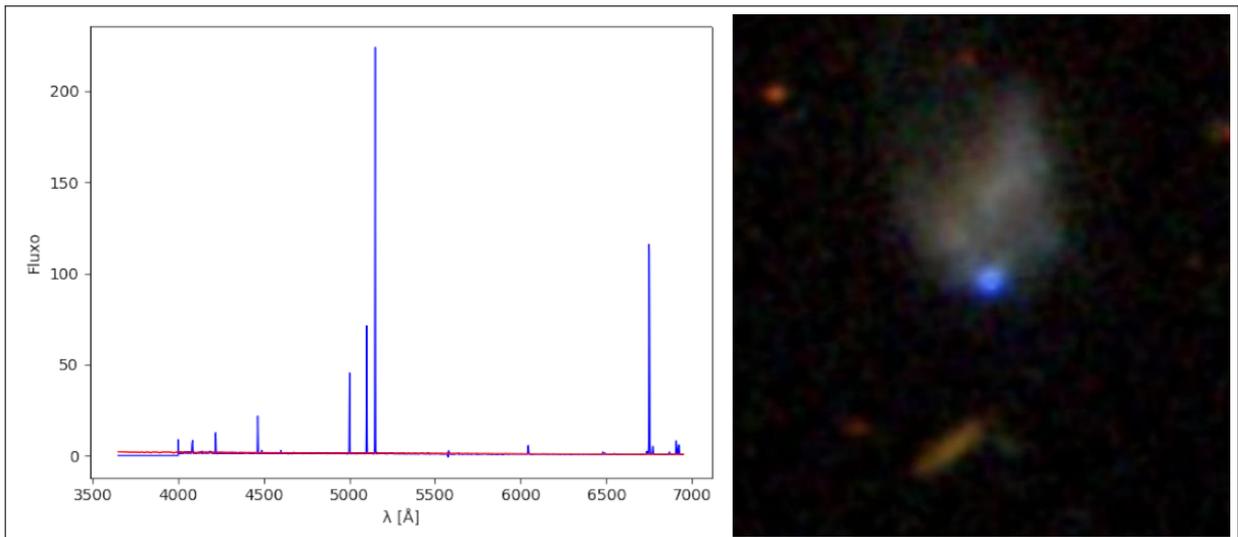


Figura 50 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 258.975615546905, Dec = 61.3610656038722

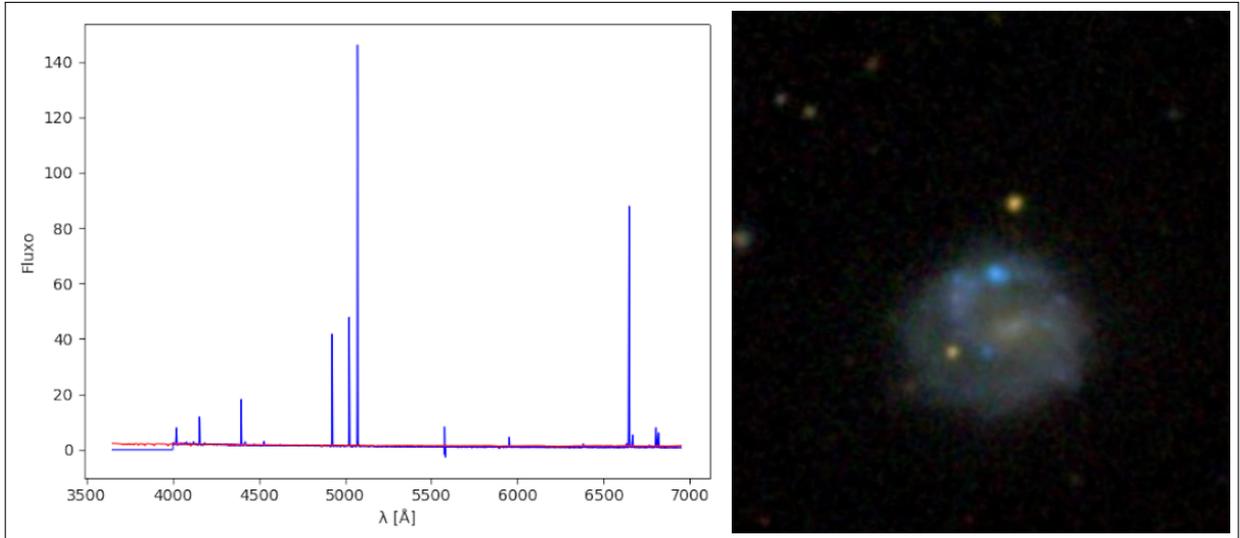


Figura 51 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 38.1340521649598, Dec = -8.60731445486275

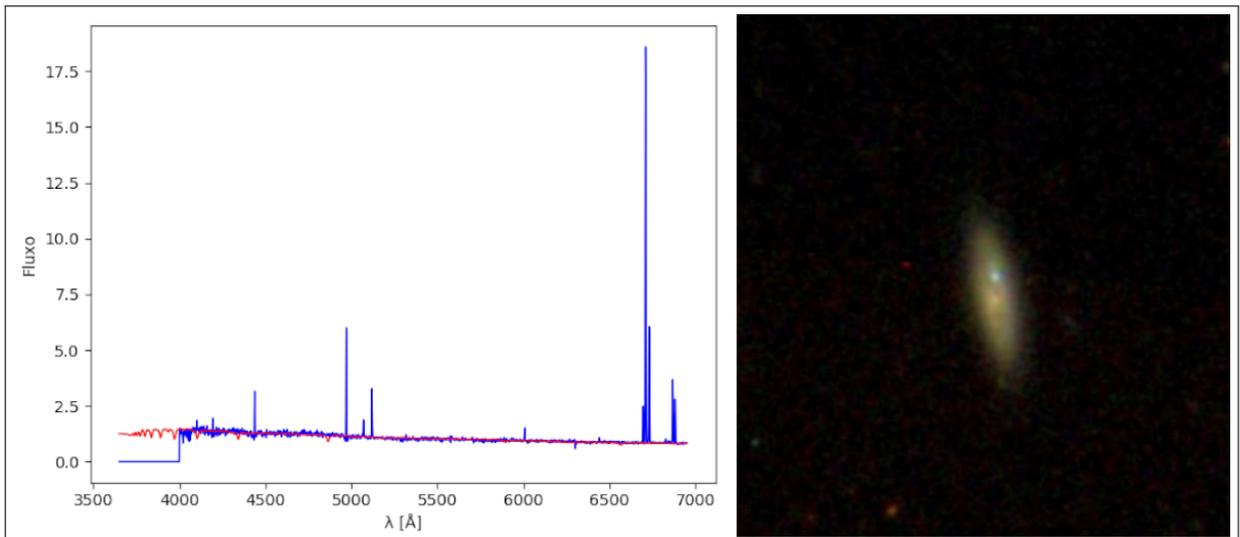


Figura 52 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 188.651231749515, Dec = -2.12272221232776

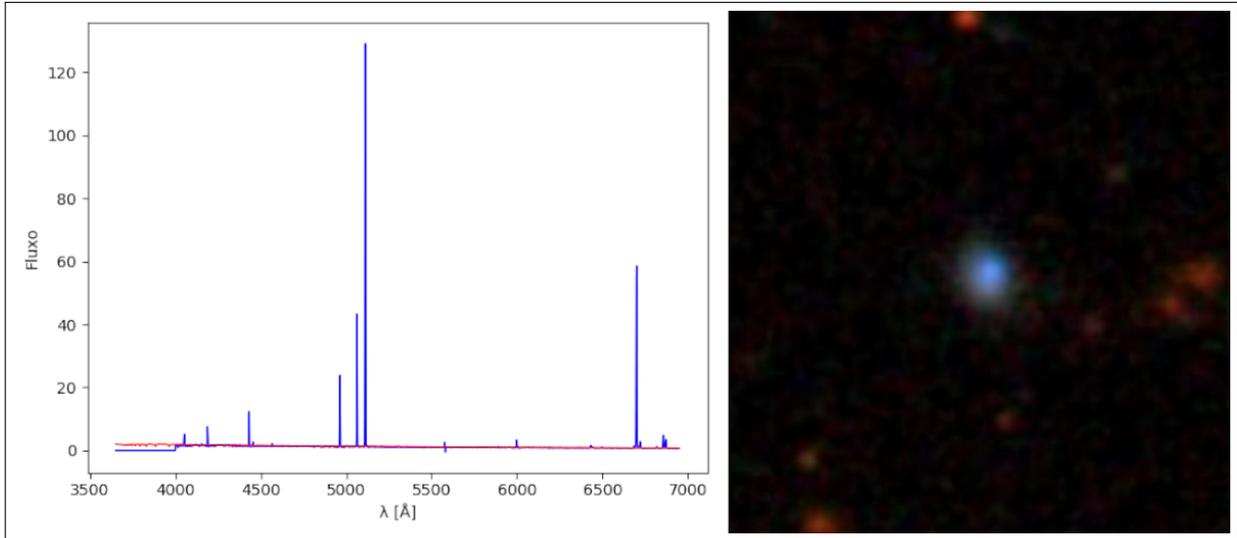


Figura 53 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 22.0859447151182, Dec = 15.4691254068453

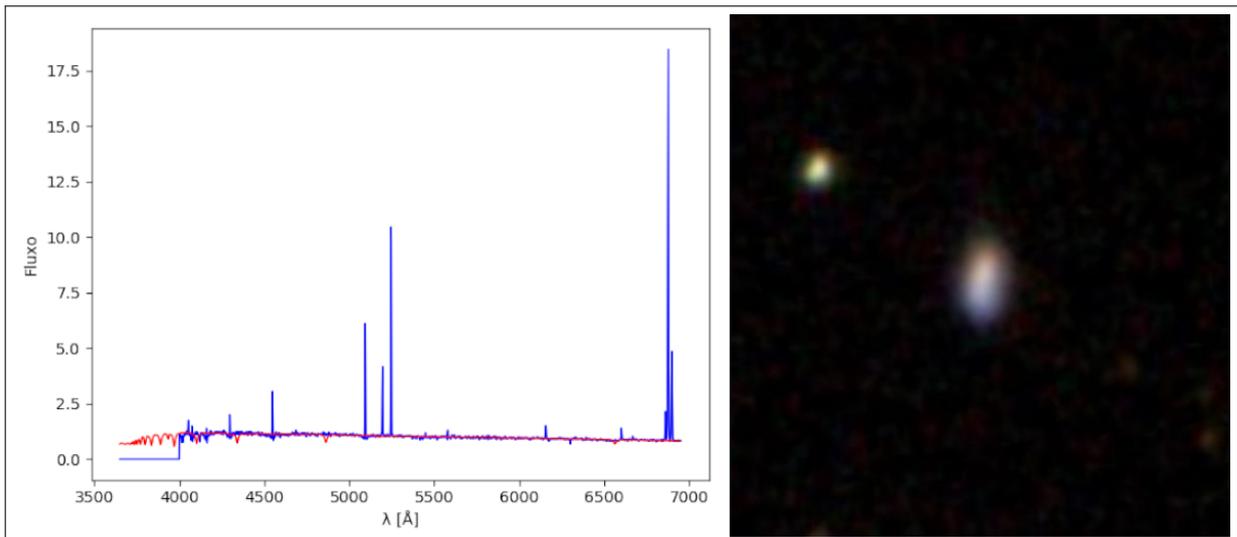


Figura 54 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 213.369716671768, Dec = 1.17031152205646

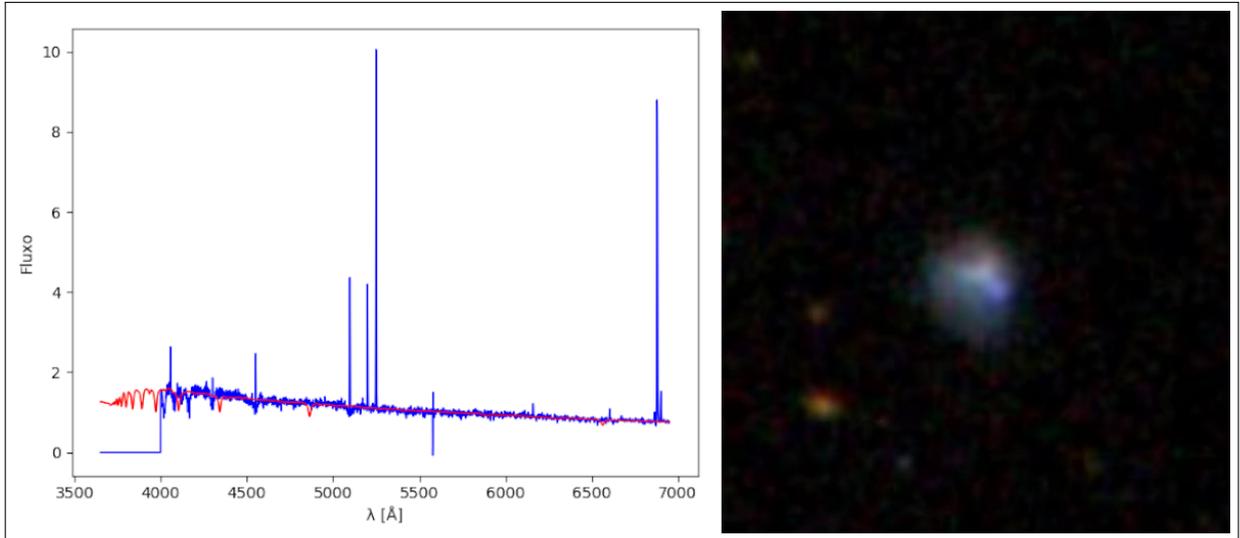


Figura 55 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 345.323539537018, Dec = 13.8750682424864

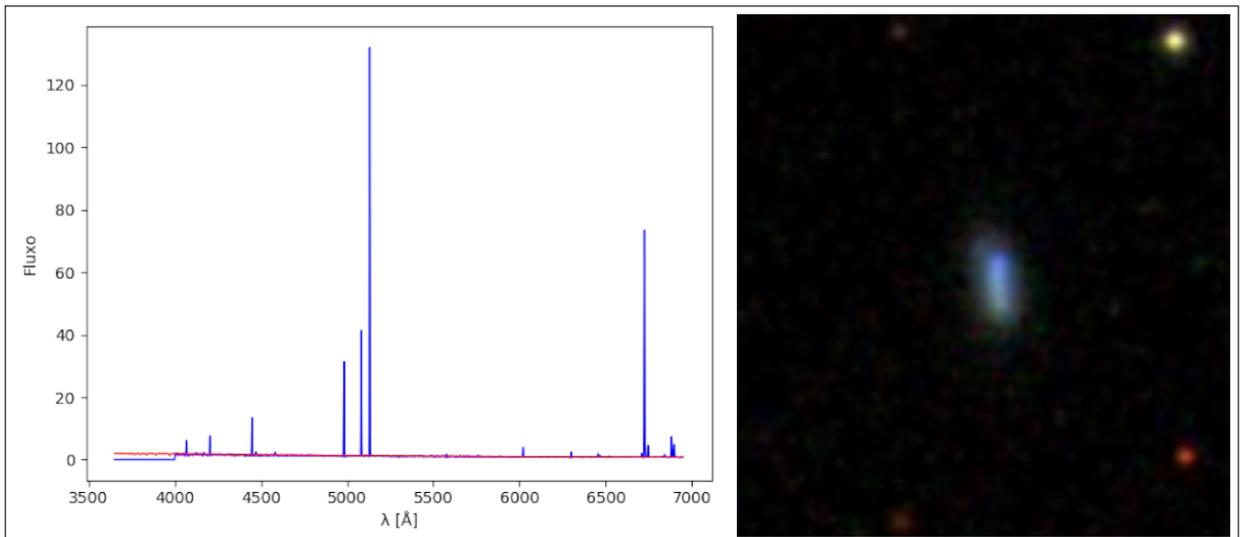


Figura 56 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 24.840529404063, Dec = 14.9882001018212

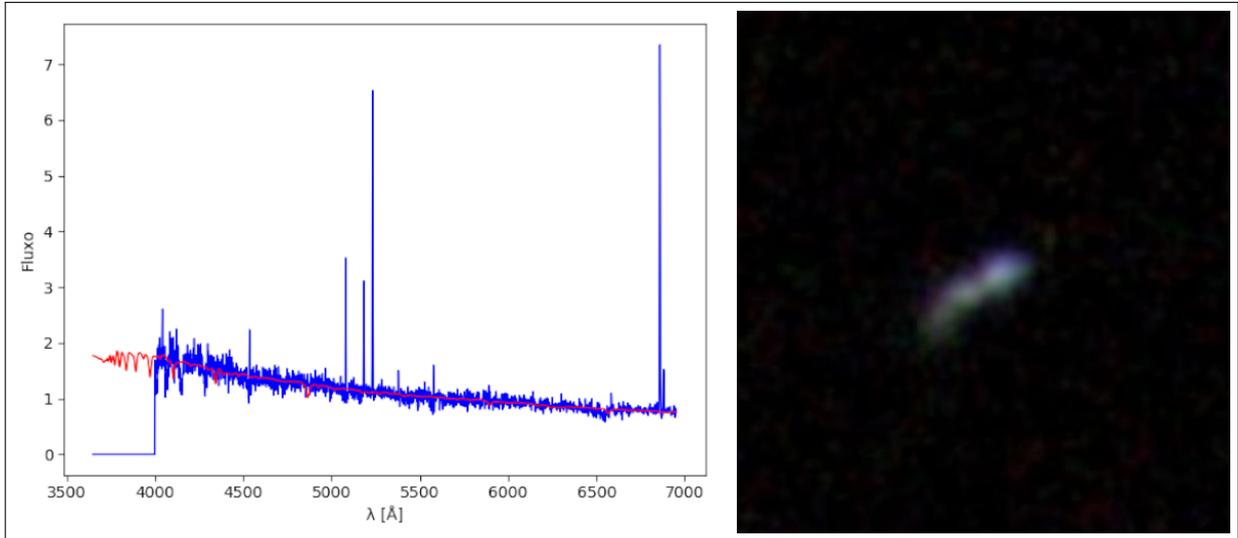


Figura 57 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 171.125137115362, Dec = 2.98422220139096

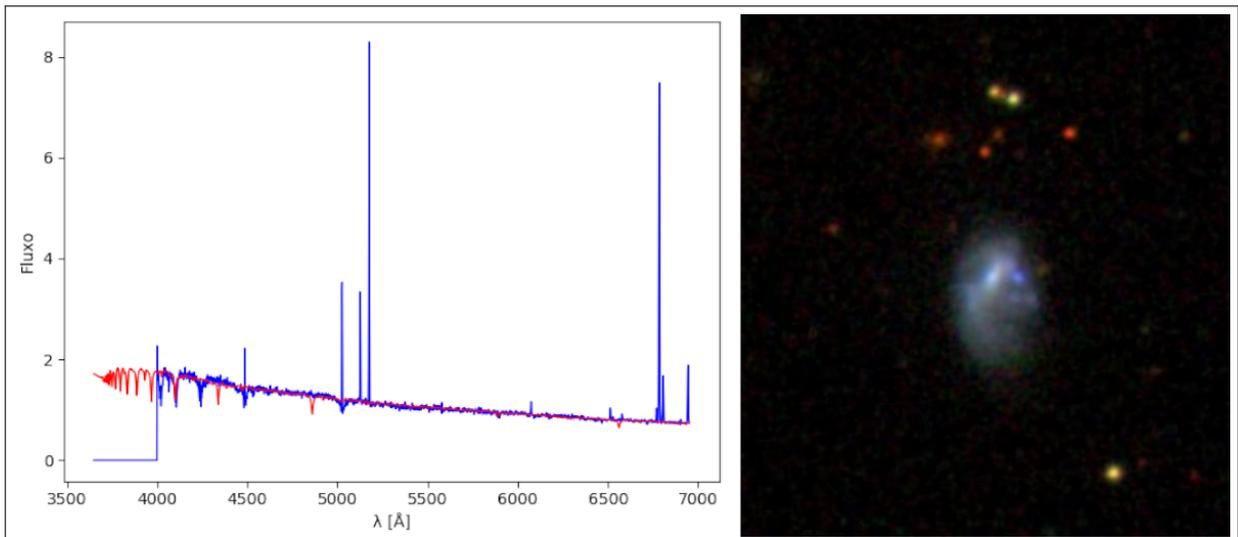


Figura 58 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 202.307377467317, Dec = 62.30921446875

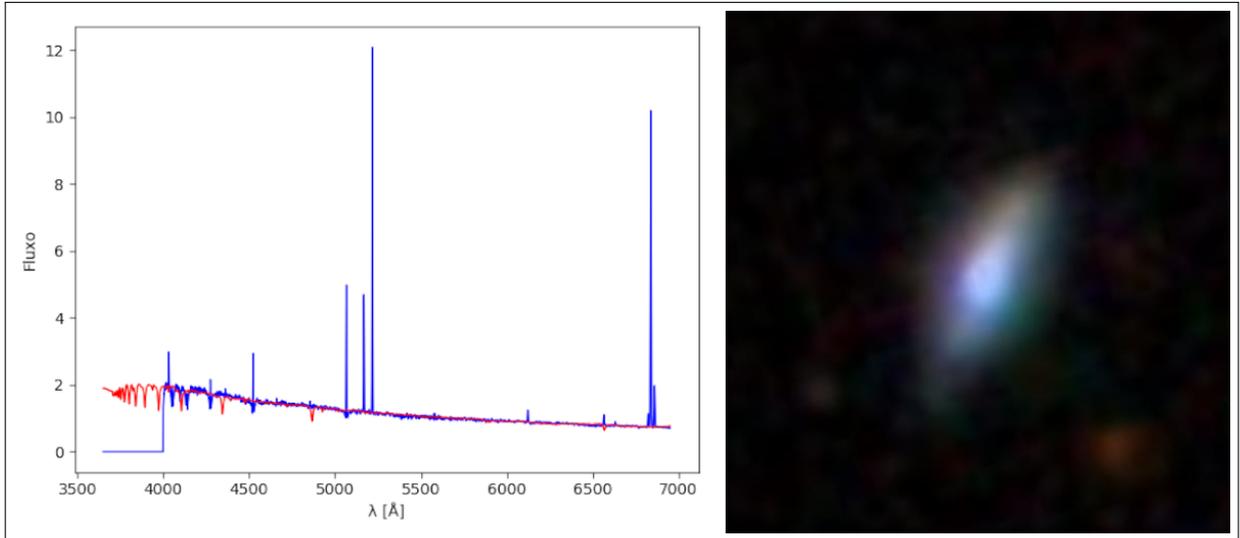


Figura 59 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 139.992773095271, Dec = 49.760076523097

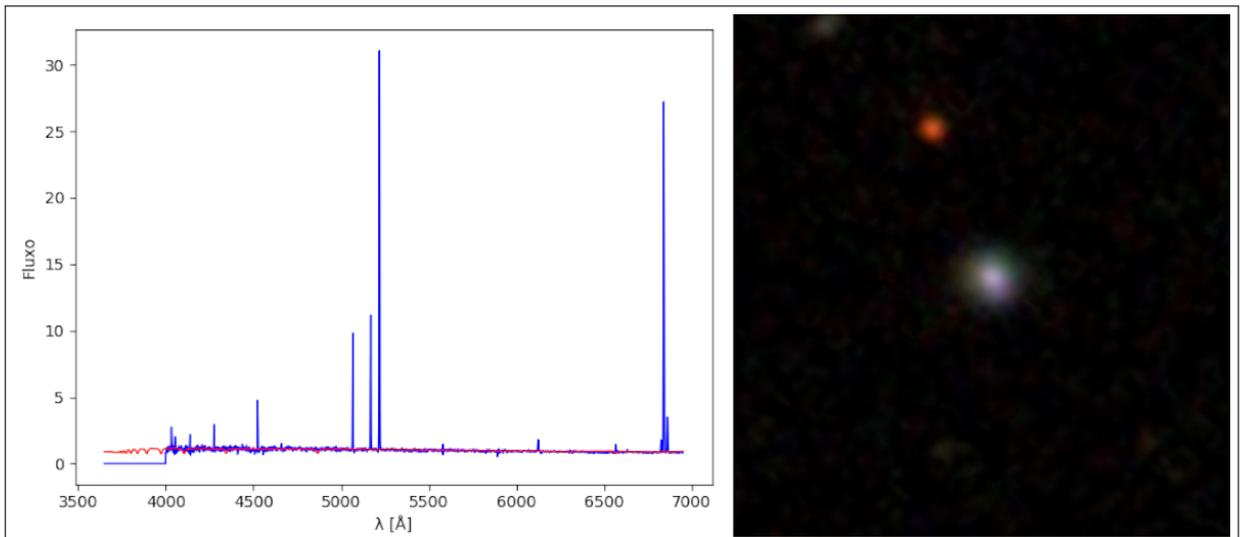


Figura 60 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 170.821804662055, Dec = 2.70352888650717

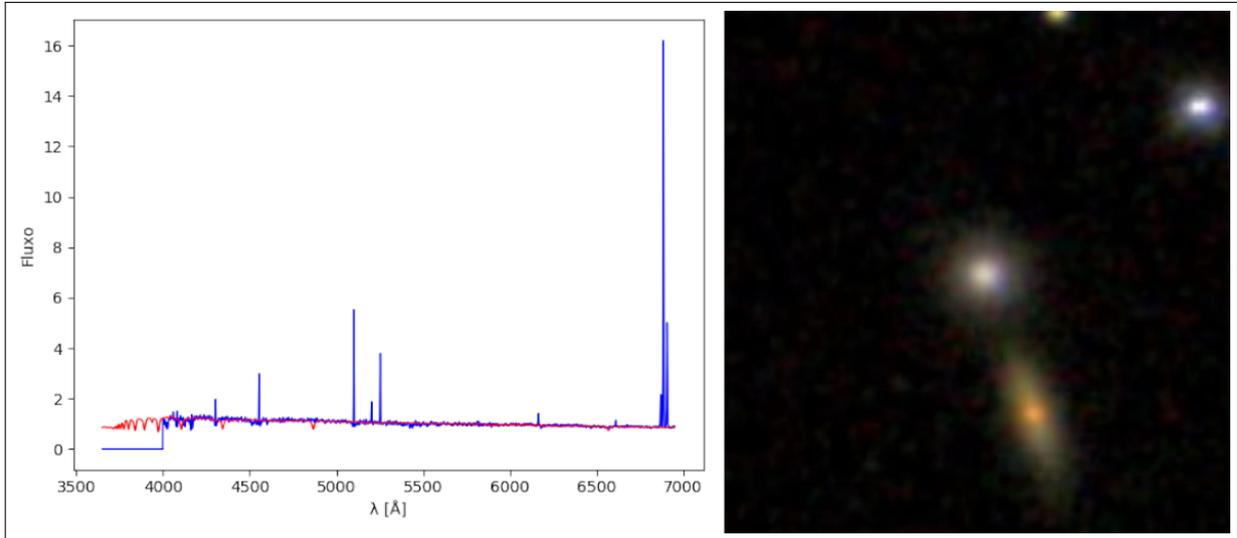


Figura 61 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 39.4563428398457, Dec = -9.43227251002141

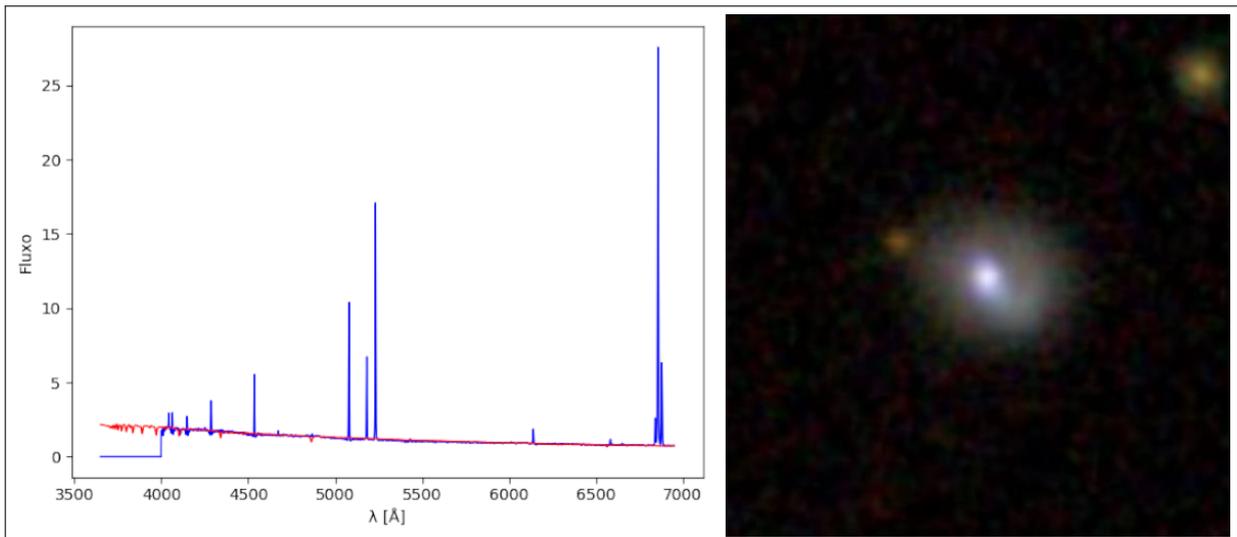


Figura 62 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 197.053681620619, Dec = 5.55502863604453

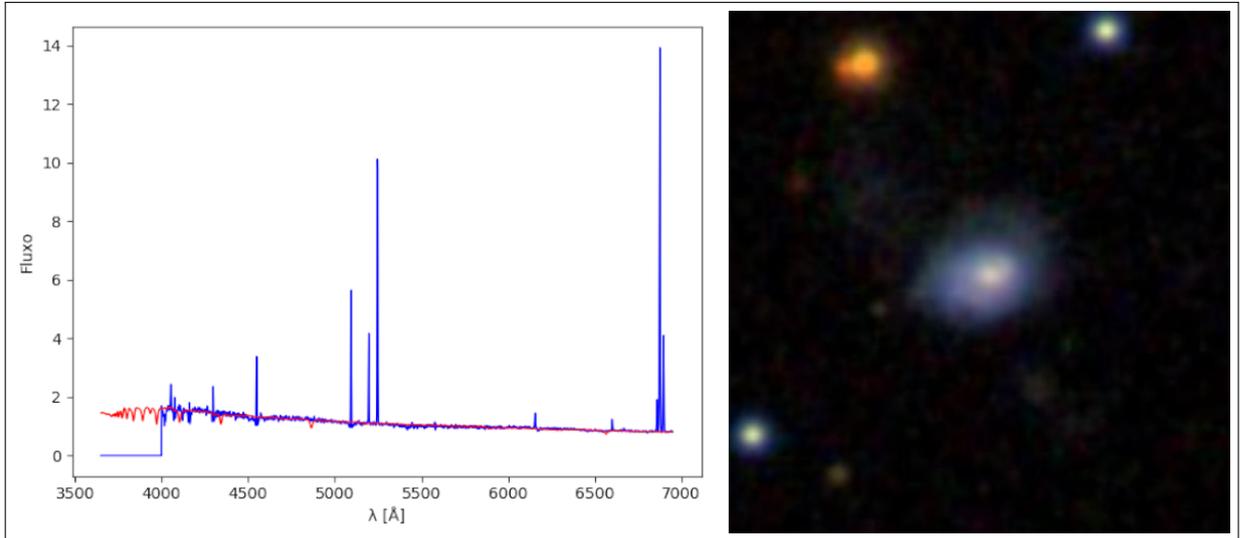


Figura 63 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 211.098252641987, Dec = 4.71790459545105

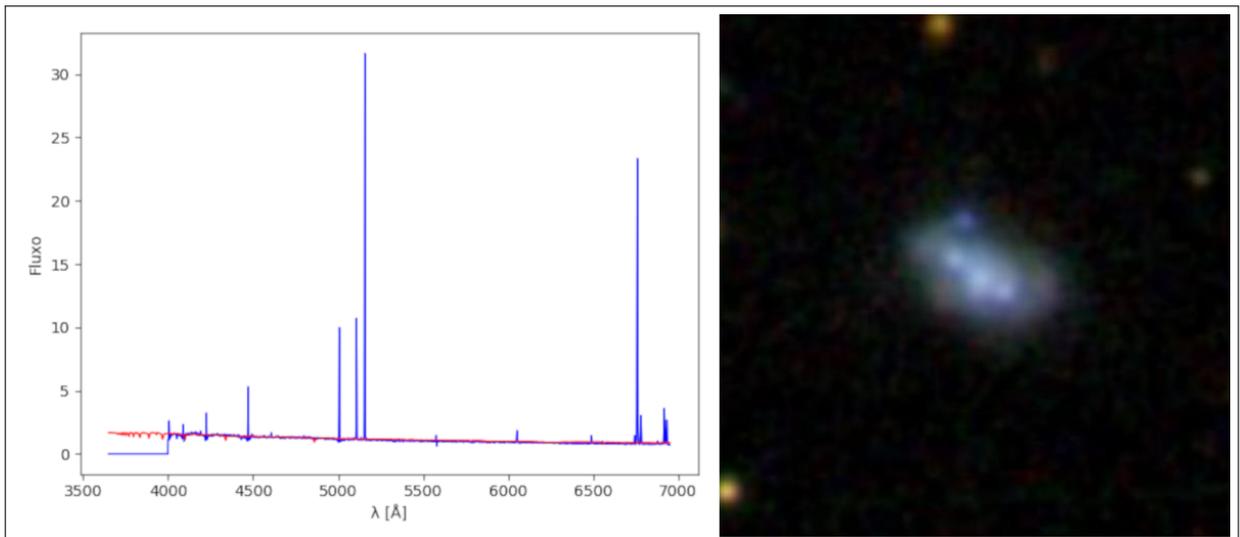


Figura 64 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 180.377191979995, Dec = -1.43611318521863

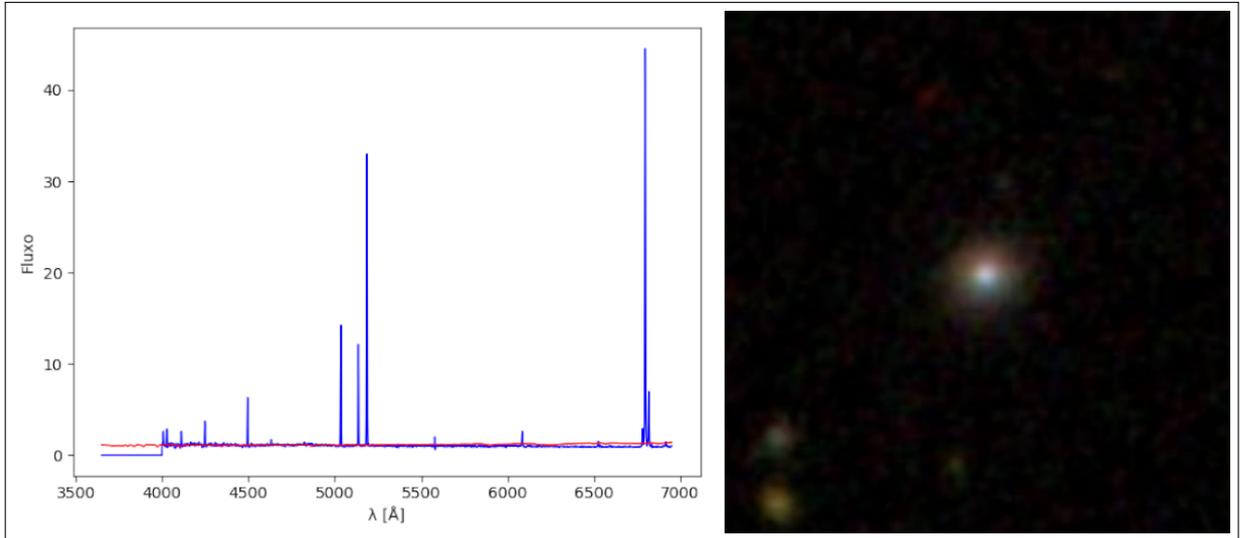


Figura 65 – Ajuste espectral feito com o STARLIGHT para a galáxia de RA = 320.919263171623, Dec = -7.81798647883067

