



Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI/MG
Mestrado Acadêmico em Física



Fotometria de Galáxias: Perfil de Brilho de De Vaucouleurs

Rafael Passos Domingues

d2021101072@unifei.edu.br

13 de outubro de 2021

Sumário

1	Resumo	3
2	Introdução	3
3	Metodologia	3
4	Resultados	9
4.1	Ajuste de <i>NGC 3522</i>	10
4.2	Ajuste de <i>NGC 5628</i>	12
4.3	Erros dos ajustes	14
4.3.1	Erros do ajuste de <i>NGC 3522</i>	14
4.3.2	Erros do ajuste de <i>NGC 5628</i>	15
4.4	Comparação com os dados da literatura	16
5	Considerações Finais	17
6	Referências	17
7	Apêndice	18
7.1	Código que ajusta as isofotas às imagens	18
7.2	Código do ajuste linear e resultados	21

1 Resumo

Foi ajustado o perfil de brilho das galáxias *NGC* 3522 e *NGC* 5628 do catálogo de De Vaucouleurs, de 1991. Os dados das galáxias escolhidas foram obtidos no *VizieR*¹ (Université de Strasbourg / CNRS)² restringindo a busca para objetos com $DEC > -1^\circ$, para obter imagens do SLOAN SDSS³, classificação morfológica $T = -5$, galáxias elípticas, que se ajustam bem ao perfil de brilho de De Vaucouleurs, $Bmag < 15$, e redshift ($0.002 < z < 0.02$) ($598 [km/s] < cz < 5980 [km/s]$). Os coeficientes das retas ajustadas forneceu resultados que permitiu calcular parâmetros físicos da galáxia como: raio efetivo, brilho superficial efetivo e luminosidade. Os valores concordam razoavelmente com a database *NASA/IPAC Extragalactic Database* (NED).⁴

2 Introdução

Diferente de galáxias espirais, que apresentam traços bastante característicos como o bojo, barra central e disco, galáxias elípticas são um tipo de galáxia com uma forma esférica achatada em distintas e variadas estruturas assimétricas.

Como consequência dessas estruturas, o movimento orbital das estrelas ao redor de seus centros é caótico, a taxa de formação estelar é baixíssima ou inexistente e por esse motivo, galáxias elípticas são ricas em população estelar predominantemente velha, com idades maiores que 9 bilhões de anos. Acredita-se que galáxias elípticas se originam da colisão de duas ou mais galáxias espirais.

Analisar estruturas de galáxias elípticas é uma tarefa importante que pode nos levar a entender vínculos de como evoluem os remanescentes de colisão de galáxias.

3 Metodologia

As galáxias *NGC* 3522 e *NGC* 5628 foram escolhidas a partir dos dados do *VizieR* e das imagens do *SLOAN SDSS*. O *SDSS* é do hemisfério norte, então restringimos a busca apenas a objetos com $DEC > -1$.

O motivo das escolhas foi pelo fato das galáxias apresentarem um campo relativamente bem centralizado e livre de ruído. Ambas as galáxias não apresentam sinais de interação, por colisão ou por fazer parte de um aglomerado de galáxias.

¹VizieR fornece a biblioteca mais completa de catálogos astronômicos publicados –tabelas e dados associados – com dados verificados e enriquecidos, acessíveis através de múltiplas interfaces. As ferramentas de consulta permitem ao usuário selecionar tabelas de dados relevantes e extrair e formatar registros que correspondem a determinados critérios.

²Acesse: <https://vizier.u-strasbg.fr/index.gml>

³Survey do hemisfério norte - - Acesse: <http://skyserver.sdss.org/dr8/en/tools/explore/obj.asp?ra=217.1083&dec=17.9253>

⁴<https://ned.ipac.caltech.edu/>



Figura 1: À esquerda, o campo de *NGC 3522* e à direita o campo de *NGC 5628*. Imagens do *SLOAN*.

Os dados principais obtidos no Vizier foram *RA*2000, *DEC*2000, *nome*, *T* (classificação morfológica de Hubble) [$T = -5$], e redshift ($0.002 < z < 0.02$).

As imagens na *banda r*, *corrected frames*, no formato *.fits.bz2* das galáxias foram obtidas no site do *SLOAN*, entrando com as coordenadas *RA* e *DEC*, em graus. Após abrir as imagens no DS9 e conferir a posição *XY* do centro aproximado das galáxias, na escala logarítmica, alterando o contraste para melhor localizar.

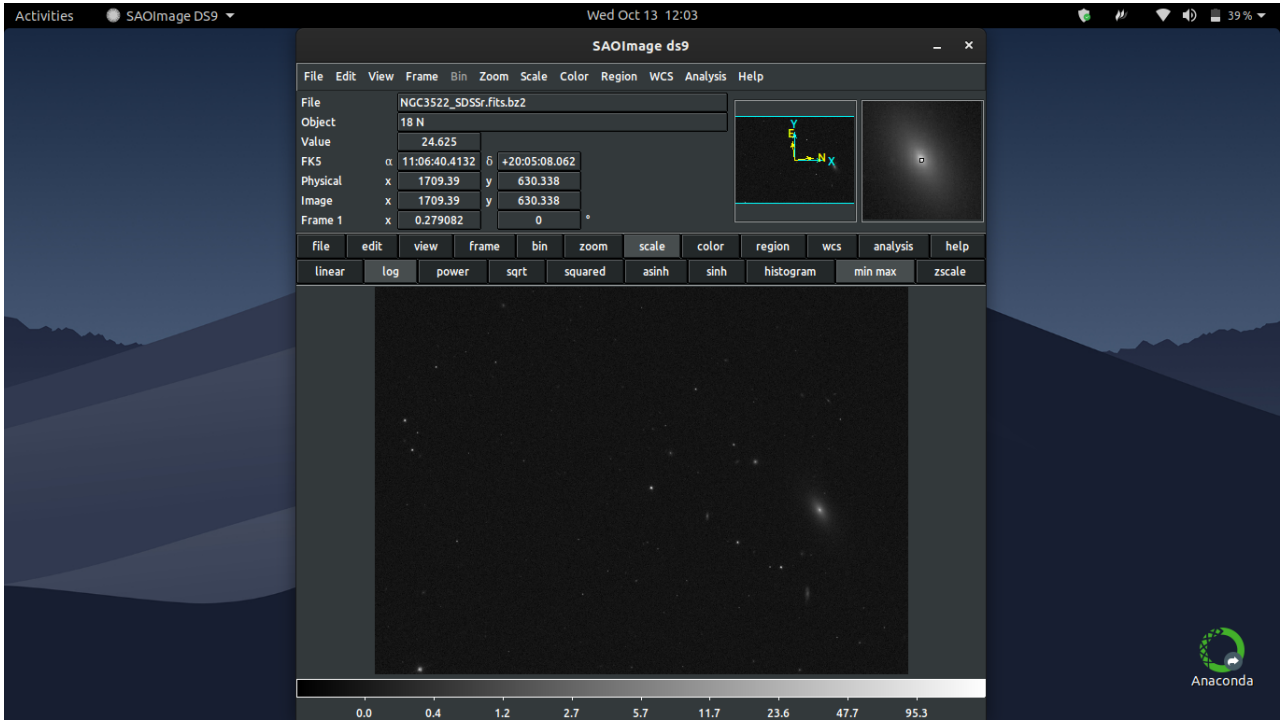


Figura 2: NGC 3522 - - $(x, y) = (1709.39, 630.338)$

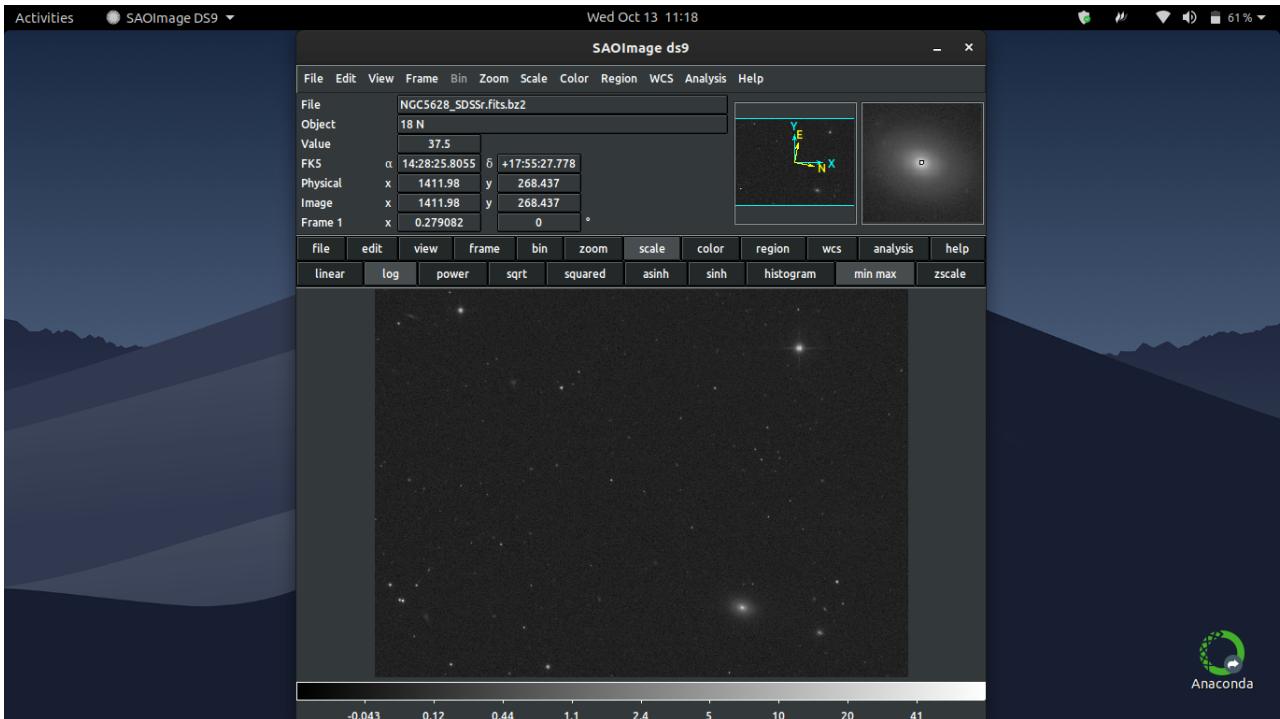


Figura 3: NGC 5628 - - $(x, y) = (1411.98, 268.437)$

Houve a preocupação em escolher imagens de galáxias o mais isoladas possível no campo e mais centralizadas possível. No código de ajuste de isofotas, foi renomeado o nome da imagem inserido os valores XY da posição do centro das galáxias na imagem. O código recorta uma área de 400×400 px na imagem e ajusta das isofotas a partir de um chute inicial, não muito ao centro da imagem.

O código importa a biblioteca *astropy* que possui as rotinas da *tarefa "ellipse"* do *IRAF*. O output do código é uma *isolist* extensa de parâmetros dos quais só importa, para este trabalho, os valores de intensidade, em *nmgy* e semieixo maior, em *pixels*.

Os valores de intensidade foram convertidos de *nanomaggies* [*nmgy*] para *Jansky* [*Jy*] (1 [*nmgy*] = $3.631 \cdot 10^{-6}$ [*Jy*]) e os valores de semi-eixo maior foram convertidos de *pixels* [px] para *segundos de arco* [*arcsec*] (1 [px] = 0.39597 [*arcsec*]), para linearizar a função de brilho superficial.

A intensidade é dada pela função,

$$I(R) = I_0 \cdot e^{-\left(\frac{R}{\alpha}\right)^{1/4}}$$

e o brilho superficial é dado por,

$$\mu(I) = -2.5 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

substituindo a função intensidade na função brilho superficial,

$$\mu(R) = -2.5 \cdot \log\left(e^{-\left(\frac{R}{\alpha}\right)^{1/4}}\right)$$

$$\mu(R) = -2.5 \cdot \left[-\left(\frac{R}{\alpha}\right)^{1/4} \right] \cdot \log(e)$$

$$\mu(R) = 2.5 \cdot \left(\frac{R}{\alpha}\right)^{1/4} \cdot \log(e)$$

$$\mu(R) = 2.5 \cdot \log(e) \cdot \left(\frac{R}{\alpha}\right)^{1/4}$$

sabendo que:

$$\log(e) = x$$

$$10^{\log(e)} = 10^x$$

$$e = 10^x$$

$$\ln(e) = \ln(10^x)$$

$$1 = x \cdot \ln(10)$$

$$x = \frac{1}{\ln(10)}$$

$$\log(e) = \frac{1}{\ln(10)}$$

podemos obter o brilho superficial em função do raio aparente.

$$\mu(R) = 2.5 \cdot \frac{1}{\ln(10)} \cdot \left(\frac{R}{\alpha}\right)^{1/4}$$

assim, é possível linearizar a função do seguinte modo;

$$y = a + b \cdot X$$

$$\mu(R) = \mu_0 + \left(\frac{2.5}{\alpha^{1/4} \cdot \ln(10)}\right) \cdot R^{1/4}$$

Onde:

Coefficiente linear:

$$a = \mu_0$$

Coeficiente angular:

$$b = \left(\frac{2.5}{\alpha^{1/4} \cdot \ln(10)} \right)$$

Através do coeficiente linear podemos calcular a intensidade, em luminosidade solar:

$$I[L_{\odot}] = 10^{\frac{M_{bol\odot} + 21.572 - a}{2.5}}$$

e também o brilho superficial no raio efetivo.

$$I_e = 10^{-3.33 \cdot I_0}$$

Através do coeficiente angular podemos calcular o raio efetivo:

$$R_e = 3459 \cdot \alpha$$

e a luminosidade:

$$L = (2n)! \cdot \pi \cdot I_0 \cdot \alpha^2$$

com $n = 4$ (galáxia elíptica)

e o brilho superficial efetivo μ_{eff} e em $mag/'^2$

Onde:

$$\alpha = \left(\frac{2.5}{b \cdot \ln(10)} \right)^4$$

4 Resultados

Os gráficos de $mag(\mu)$ VS raiz quarta do raio aparente ($R^{1/4}$) se aproximam bastante de uma reta. Os resíduos dos ajustes mostraram-se satisfatoriamente pequenos, não havendo muitas estruturas externas presentes nas galáxias escolhidas.

4.1 Ajuste de *NGC 3522*

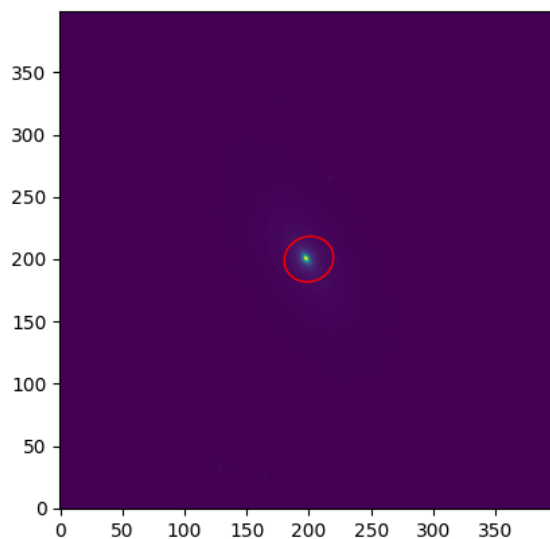


Figura 4: Elipse inicial

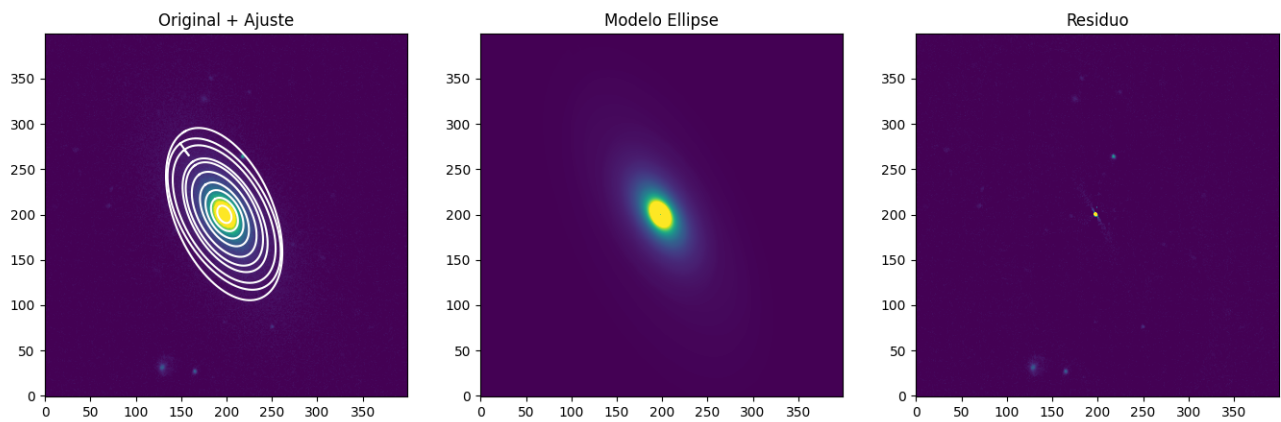


Figura 5: Isofotas de *NGC 3522*

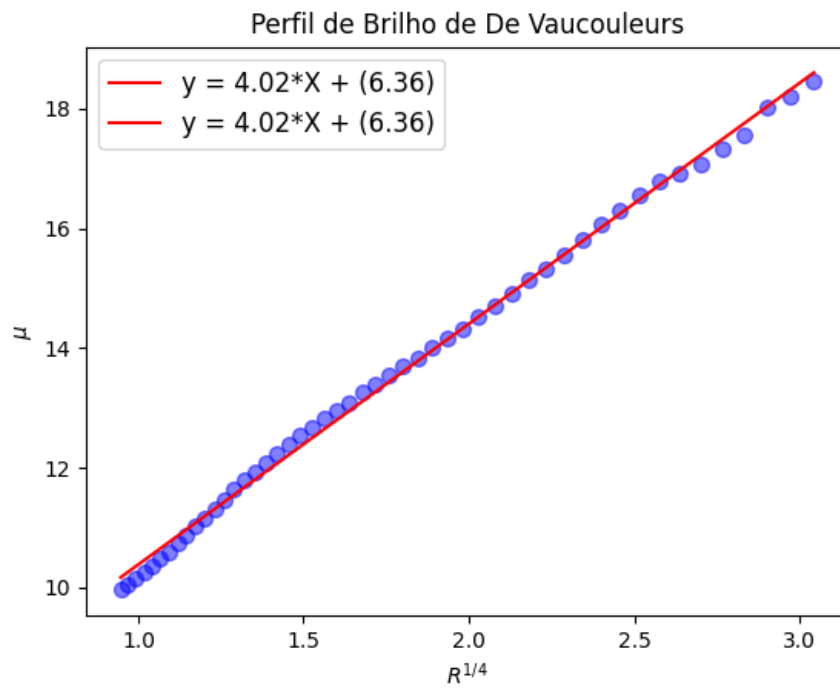


Figura 6: Ajuste linear do perfil de brilho de *NGC 3522*

4.2 Ajuste de *NGC 5628*

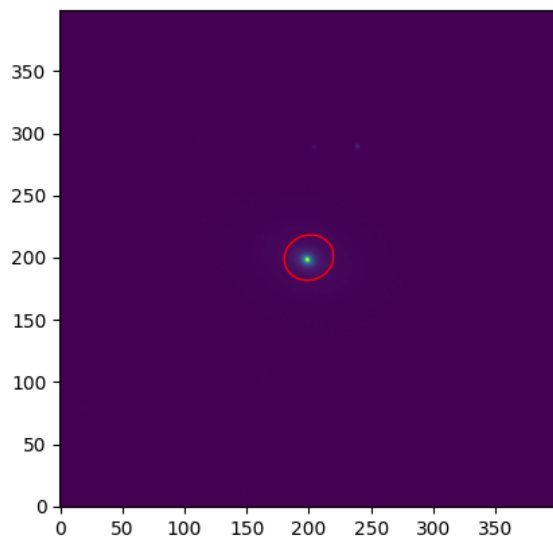


Figura 7: Elipse inicial

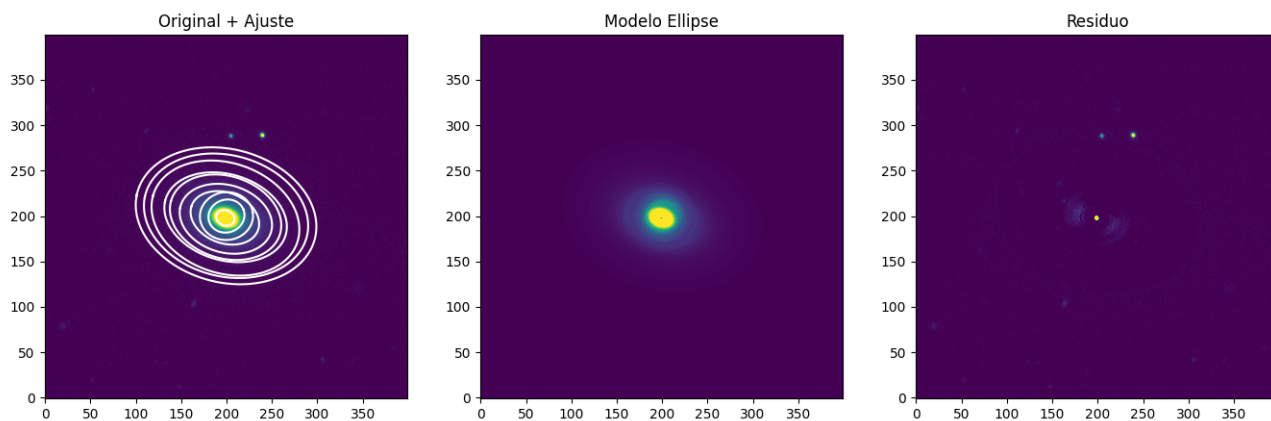


Figura 8: Isofotas de *NGC 5628*

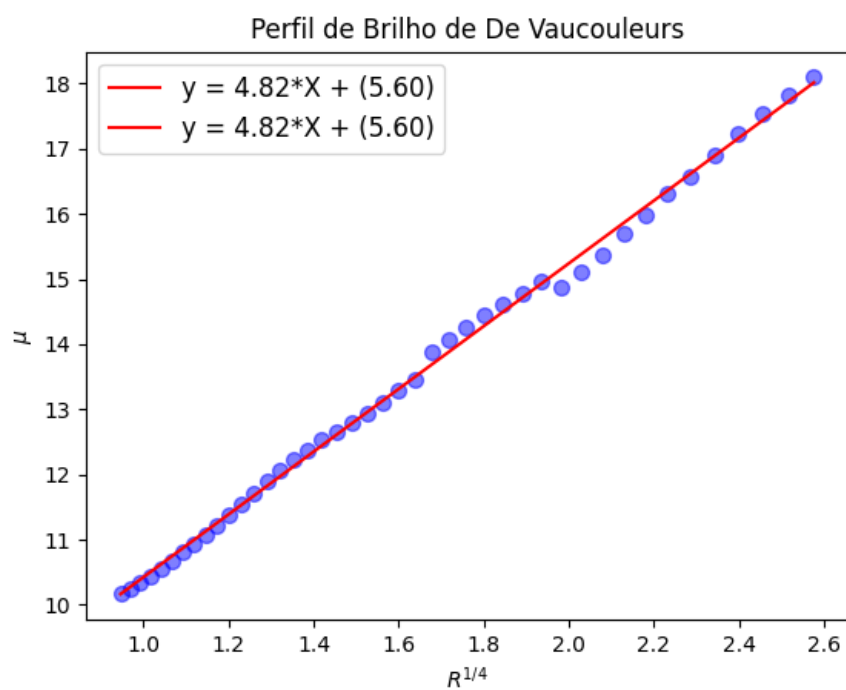


Figura 9: Ajuste linear do perfil de brilho de *NGC 5628*

4.3 Erros dos ajustes

4.3.1 Erros do ajuste de *NGC 3522*

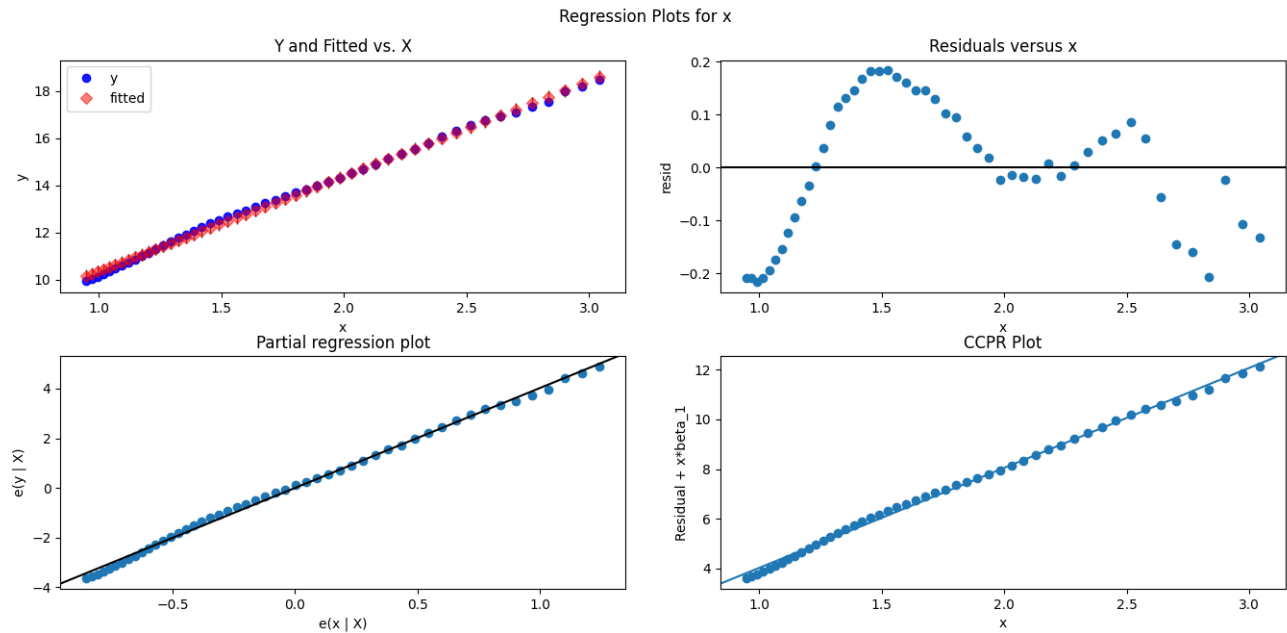


Figura 10: Regressão

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	y	R-squared:	0.997			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.997			
Method:	Least Squares	F-statistic:	1.895e+04			
Date:	Wed, 13 Oct 2021	Prob (F-statistic):	5.23e-64			
Time:	12:07:29	Log-Likelihood:	33.478			
No. Observations:	50	AIC:	-62.96			
Df Residuals:	48	BIC:	-59.13			
Df Model:	1					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	6.3560	0.056	114.399	0.000	6.244	6.468
x	4.0238	0.029	137.669	0.000	3.965	4.083
Omnibus:	8.013	Durbin-Watson:	0.111			
Prob(Omnibus):	0.018	Jarque-Bera (JB):	2.981			
Skew:	-0.256	Prob(JB):	0.225			
Kurtosis:	1.919	Cond. No.	7.41			

Figura 11: Dados da Regressão Linear

4.3.2 Erros do ajuste de *NGC 5628*

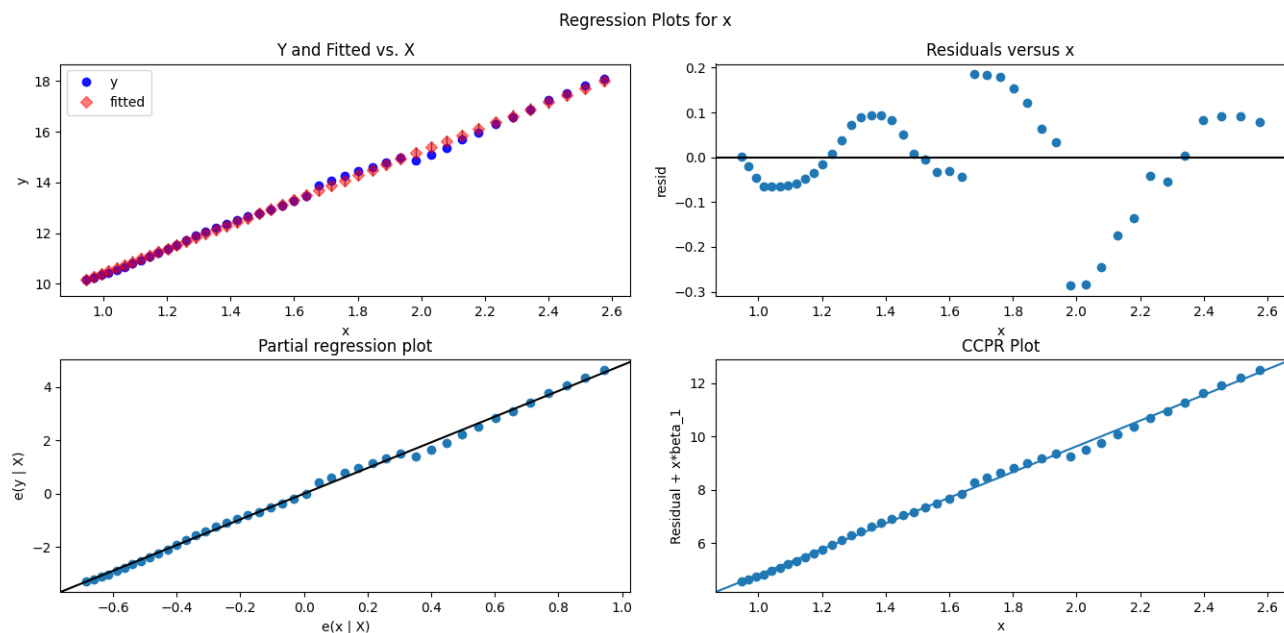


Figura 12: Regressão

```

=====
                        OLS Regression Results
=====
Dep. Variable:          y      R-squared:                0.998
Model:                  OLS    Adj. R-squared:           0.998
Method:                 Least Squares    F-statistic:       1.793e+04
Date:                   Wed, 13 Oct 2021    Prob (F-statistic): 8.60e-56
Time:                   11:23:39    Log-Likelihood:    33.840
No. Observations:      43    AIC:                -63.68
Df Residuals:          41    BIC:                -60.16
Df Model:               1
Covariance Type:       nonrobust
=====

```

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	5.6032	0.061	91.628	0.000	5.480	5.727
x	4.8184	0.036	133.921	0.000	4.746	4.891

```

=====
Omnibus:                5.540    Durbin-Watson:       0.377
Prob(Omnibus):          0.063    Jarque-Bera (JB):    4.278
Skew:                   -0.708    Prob(JB):            0.118
Kurtosis:               3.618    Cond. No.            8.01
=====

```

Figura 13: Dados da Regressão Linear

Com os coeficientes do ajuste foi possível calcular:

- Brilho superficial interno: $\mu_0 = a$;
- Intensidade isofotal interna: I_0 ;
- Intensidade isofotal no raio efetivo: I_{eff} ;
- α ;
- Raio efetivo: R_{eff} ;
- Luminosidade: L ;
- Raio físico real: r .

Galáxia	<i>NGC 3522</i>	<i>NGC 5628</i>
μ_0	6.3559	5.6031
I_0	0.002868	0.005737
I_{eff}	$1.3415 \cdot 10^{-6}$	$2.6836 \cdot 10^{-6}$
α	0.005300	0.002578
R_{eff}	18.3360	8.9175
$L [L_\odot]$	0.01020	0.00483
$r [kpc]$	2.0126	3.7768

4.4 Comparação com os dados da literatura

Os valores de raio físico concordam razoavelmente com a database *NASA/IPAC Extragalactic Database* (NED).⁵ Já os valores de luminosidade divergem muito.

```
=====
Concordância
-----
concordance_raio = 0.9489760395604117
concordance_Lumi = -991998.9998979074
=====
```

Figura 14: Concordância nos resultados de *NGC 3522*

⁵<https://ned.ipac.caltech.edu/>

```
=====
Concordância
-----
concordance_raio = 0.8767686792466451
concordance_Lumi = -355999998.9999517
=====
```

Figura 15: Concordância nos resultados de *NGC 5628*

5 Considerações Finais

Os valores de luminosidade divergem muito dos encontrados na database *NASA/IPAC Extragalactic Database* (NED).⁶ A explicação para isso se deve à provavelmente algum tipo de conversão necessária entre a luminosidade encontrada e a luminosidade bolométrica na banda específica do *SLOAN*.

Apesar de não ter entendido a divergência dos resultados de luminosidade, este trabalho me fez aprender coisas muito interessantes: Foi meu primeiro contato, coletando dados do Vizier, meu primeiro contato com rotinas do IRAF e o poder da biblioteca astropy em vincular rotinas do IRAF com o python. Foi muito interessante entender como o python coleta a informação de intensidade isofotal e transforma em números associados a parâmetros da elipse. Outro ponto importante foi o contato com o survey do SLOAN e o ds9.

Foi particularmente curioso testar ajustes de isofotas em distintas imagens de galáxias: algumas com sinais de interação ou núcleo ativo foram "facilmente resolvidas". É impressionante como o ajuste isofotal separa as estruturas e revela a parte mais interna das galáxias com disco, ou ainda, revela estruturas mais externas, remanescentes de colisão de galáxias. Em meio à busca de imagens, o campo de *NGC 7317*, em especial, chamou muito a atenção, porém, nada viável à aplicação do ajuste do perfil de brilho de De Vaucouleurs.

6 Referências

- 1 <https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR?-source=VII/155>
- 2 <http://skyserver.sdss.org/dr8/en/tools/explore/>
- 3 <https://ds9.si.edu/>
- 4 <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
- 5 <https://ned.ipac.caltech.edu/>
- 6 Peter Scheneider
- 7 Notas de aula: Prof. Oscar Cavichia, UNIFEI.

⁶<https://ned.ipac.caltech.edu/>

7 Apêndice

7.1 Código que ajusta as isofotas às imagens

```
#!/usr/bin/python
# -*- coding: utf-8 -*-

__author__ = 'Oscar_Cavichia'

import sys
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

import astropy

from astropy.modeling.models import Gaussian2D
from astropy.io import fits
from astropy.nddata import Cutout2D
from astropy.wcs import WCS

#!pip3 install photutils

import photutils

from photutils.datasets import make_noise_image
from photutils.isophote import EllipseGeometry
from photutils.aperture import EllipticalAperture
from photutils.isophote import Ellipse
from photutils.isophote import build_ellipse_model

def main(argv=None):

    #Substituir a imagem abaixo pela sua

    imageFile = "NGC3522_SDSSr.fits.bz2"

    # https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR-4
    # http://skyserver.sdss.org/dr8/en/tools/explore/obj.asp?ra=166.6708&dec=20.0856
    # RA: 166.6708 deg / DEC: 20.0856 deg
    # http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic?Ident=NGC+3522&submit=SIMBAD+search
    # https://ned.ipac.caltech.edu/byname?objname=NGC+3522&hconst=67.8&omegam=0.308&
    # omegav=0.692&wmap=4&corr_z=1

    hdul = fits.open(imageFile)
    #hdul.info()

    hdu=fits.open(imageFile)[0]

    image_data=hdu.data
```

```

wcs = WCS(hdu.header)

#Verificar no ds9 as coordenadas x0 e y0 da galaxia e mudar os valores:

position = (1709.39, 630.338)
size = (400, 400)

cutout = Cutout2D(image_data, position=position, size=size, wcs=wcs)
image_data_cut = cutout.data

plt.imshow(image_data_cut, origin='lower', cmap='viridis', vmin=0, vmax=1)

#Caso mude os valores de size, substituir x0 e y0 abaixo pela metade dos valores
geometry = EllipseGeometry(x0=200, y0=200, sma=20, eps=0.1, pa=20.*np.pi/180.)
aper = EllipticalAperture((geometry.x0, geometry.y0), geometry.sma,
geometry.sma*
(1 - geometry.eps), geometry.pa)
plt.imshow(image_data_cut, origin='lower')

aper.plot(color='red')

#Criamos uma instancia da classe Ellipse para fazer o ajuste de isofotas elipticas

ellipse = Ellipse(image_data_cut, geometry)

#Fazemos o ajuste da elipse com o metodo fit_image. Nao ajustamos em menos de 2 pixels.

isolist = ellipse.fit_image(minsma=2)

#O resultado eh o objeto isolist que contem os atributos:

#https://photutils.readthedocs.io/en/stable/api/photutils.isophote.IsophoteList.html
#photutils.isophote.IsophoteList

#Vamos imprimir os semieixos das isofotas

print("sma={0}\nintens={1}".format(isolist.sma, isolist.intens))

#Os nomes de cada coluna sao:

print(isolist.get_names())

#Podemos imprimir uma tabela ordenada por sma:

print(isolist.to_table())

```

```

#Vamos salvar a tabela em uma arquivo txt

from tabulate import tabulate

with open( 'dados_ajuste.txt', 'w') as f:
    f.write(tabulate(isolist.to_table(["sma","intens"])))

#Construir uma imagem do modelo

model_image = build_ellipse_model(image_data_cut.shape, isolist)

residual = image_data_cut - model_image

fig, (ax1, ax2, ax3) = plt.subplots(figsize=(14, 5), nrows=1, ncols=3)

fig.subplots_adjust(left=0.04, right=0.98, bottom=0.02, top=0.98)

ax1.imshow(image_data_cut, origin='lower', cmap='viridis', vmin=0, vmax=2)

ax1.set_title('Original + Ajuste')

smas = np.linspace(10, 100, 10)

for sma in smas:
    iso = isolist.get_closest(sma)

    x, y, = iso.sampled_coordinates()

    ax1.plot(x, y, color='white')

ax2.imshow(model_image, origin='lower', cmap='viridis', vmin=0, vmax=2)
ax2.set_title('Modelo Ellipse')

ax3.imshow(residual, origin='lower', cmap='viridis', vmin=0, vmax=2)
ax3.set_title('Residuo')

plt.show()

return 0

if __name__ == "__main__":
    sys.exit(main())

```

7.2 Código do ajuste linear e resultados

```
#!/usr/bin/python
# -*- coding: utf-8 -*-

__author__ = 'Rafael Passos Domingues'


import sys
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

import scipy as sp
import pandas as pd
import statsmodels.api as sm

def concordance(database, measured):

    c = 1 - (database - measured)/100

    return c

def linearfit(X,Y):

    # Linear Fit

    # create data
    df = pd.DataFrame({'x': X, 'y': Y})

    # fit simple linear regression model
    y = df['y']
    x = df['x']
    x = sm.add_constant(x)
    model = sm.OLS(y, x).fit()

    # view model summary
    print('=' * 78)
    print(model.summary())

    # produce residual plots
    fig = plt.figure(figsize=(12, 8))
    fig = sm.graphics.plot_regress_exog(model, 'x', fig=fig)

    plt.show()

    # regression part
    slope, intercept = model.params[1], model.params[0]

    line = slope * x + intercept
    plt.plot(x, line, 'r', label='y = {:.2f}*X + {:.2f}'.format(slope, intercept))
```

```

plt.legend(fontsize=12)

# create scatterplot
plt.scatter(df.x, df.y, color='blue', s=50, alpha=.5)
plt.title('Perfil_de_Brilho_de_De_Vaucouleurs')
plt.xlabel('$R^{1/4}$')
plt.ylabel('$\mu$')

plt.show()

return slope, intercept

def main(argv=None):

    # Dados

    dados = pd.DataFrame(
        [[float(token) for token in line.split()]
         for line in open("dados_ajuste.txt") if line.strip()],
        columns = ["sma", "intens"]
    )

    sma = np.array(dados['sma']) # X
    intens = np.array(dados['intens']) # Y

    # Conversoes — [px -> arcsec] & [nmgy -> Jy]
    sma = sma * (0.39597) # [arcsec]
    intens = intens * (3.631 * 10**(-6)) # [Jy]

    # Semieixos maiores ajustados, elevados a (1/4)
    R14 = sma**(.25) # R**(1/4) # [arcsec**(1/4)]

    # Brilho superficial
    mu = -2.5 * np.log10(intens)

    # — — —

    # Coeficientes do ajuste
    slope, intercept = linearfit(R14, mu)

    print('\n')
    print('= ' * 78)
    print('Coeficientes')
    print('- ' * 78)
    print('slope = {0}'.format(slope))
    print('intercept = {0}'.format(intercept))
    print('= ' * 78)
    print('\n')

    # — — —

```

```

# Resultados

mu_0 = intercept
I_0 = 10**(-(2/5) * intercept)

# Magnitude Bolometrica do Sol
# Ref: https://www.astro.princeton.edu/~gk/A403/constants.pdf
Mbol_sun = 4.74

I0 = 10**((Mbol_sun + 21.572 - mu_0)/(2.5)) # [L_sun]
I_e = 10**(-3.33) * I_0

alpha = ((2.5)/(slope * np.log(10)))**(4)
R_eff = 3459 * alpha

distance = 22.64 * 10**(3) # [kpc] # 22.64 +/- 1.62 [Mpc] (CMB)
theta = R_eff * (4.84814 * 10**(-6)) # [rad]
r = distance * np.sin(theta) # [kpc]

R_opt = 2.5 * R_eff # Raio optico

# Luminosidade

n = 4 # galaxia eliptica
j = 2*n
fat = 1
i = 2
while i <= j:
    fat = fat*i
    i = i + 1

L = fat * np.pi * I_0 * alpha**(2)

# Area dos pixels
A = (0.39597)**(2)

# Brilho superficial efetivo
mu_eff = 22.5 - 2.5 * np.log10(intens) + 2.5 * np.log10(A) # [mag/arcsec**2]

print('=' * 78)
print('Resultados')
print('-' * 78)

print('mu_0 = {0}'.format(mu_0))
print('I_0 = {0}'.format(I_0))
print('I0 = {0} [L_sun]'.format(I0))
print('I_e = {0}'.format(I_e))

print('alpha = {0}'.format(alpha))
print('R_eff = {0} [kpc]'.format(R_eff))
print('r = {0} [kpc]'.format(r))

```

```

print ( 'R_opt_={0}_[kpc] '.format(R_opt))

print ( 'L_={0}_[L_sun] '.format(L))

print ( 'mu_eff_={0}_[mag/arcsec**2] '.format(mu_eff))

print ( '=' * 78)
print ( '\n' )

# Concordance

concordance_r = concordance(14.23/2,r)
concordance_L = concordance(9.92E7,L)

print ( '=' * 78)
print ( 'Concordancia ' )
print ( '-' * 78)

print ( 'concordance_raio_={0} '.format(concordance_r))
print ( 'concordance_Lumi_={0} '.format(concordance_L))

print ( '=' * 78)
print ( '\n' )

return 0

if __name__ == "__main__":
    sys.exit(main())

```