

Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Centro de Ciências da Matemática e da Natureza  
Observatório do Valongo

# **Estudo Morfológico do Espectro de Estrelas Supermassivas**

Matheus Mendes Silva Barboza

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2021

MATHEUS MENDES SILVA BARBOZA

ESTUDO MORFOLÓGICO DO ESPECTRO DE ESTRELAS  
SUPERMASSIVAS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Curso de Graduação em Astronomia, Observatório do Valongo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Astrônomo.

Orientador: Wagner Luiz Ferreira Marcolino  
- OV/UFRJ

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2021

## CIP - Catalogação na Publicação

BB239e Barboza, Matheus Mendes Silva  
Estudo Morfológico do Espectro de Estrelas  
Supermassivas / Matheus Mendes Silva Barboza. --  
Rio de Janeiro, 2021.  
32 f.

Orientador: Wagner Luiz Ferreira Marcolino.  
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Observatório  
do Valongo, Bacharel em Astronomia, 2021.

1. Estrelas Supermassivas. 2. Astrofísica  
Estelar. 3. CMFGEN. 4. Modelos de Atmosfera. 5.  
Espectroscopia. I. Marcolino, Wagner Luiz Ferreira,  
orient. II. Título.

# Resumo

As estrelas massivas (massa  $M \gtrsim 8 M_{\odot}$ ) têm características extremas se comparadas às estrelas de baixa massa. Elas alcançam temperaturas superficiais de até cerca de 50000 K e chegam a luminosidades de até  $10^6 L_{\odot}$ . Apresentam ventos estelares muito fortes (taxa de perda de massa da ordem de  $10^{-5} M_{\odot}/\text{ano}$ ) e fluxos ionizantes muito intensos, influenciando consideravelmente em seus arredores. Além disso, terminam suas vidas como objetos extremos, como por exemplo supernovas, estrelas de nêutrons ou buracos negros. Essas estrelas têm portanto papel fundamental em diferentes áreas da Astrofísica.

Até pouco tempo, acreditava-se ser fisicamente impossível uma estrela ter massa maior do que cerca de 150 vezes a massa do Sol ( $150 M_{\odot}$ ). No entanto, observações recentes com o telescópio Hubble sugerem a existência de estrelas com massas de até  $300 M_{\odot}$ , ultrapassando esse suposto limite superior. Estrelas com massas maiores que  $100 M_{\odot}$  são chamadas atualmente de estrelas supermassivas. O feedback dessas estrelas ao meio circundante é significativo, mas é ignorado em certos modelos de galáxias "starbursts" (galáxias com alta formação de estrelas).

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é estudar as propriedades espectrais de estrelas supermassivas. Para tanto, utilizamos modelos sofisticados que descrevem o transporte radiativo em um fluido em expansão (atmosferas com ventos – código CMFGEN). A análise iniciou-se com alguns modelos de estrelas supergigantes O (p.e., Zeta Puppis), com massas entre  $50 - 60 M_{\odot}$ . A massa e outros parâmetros foram gradualmente aumentados objetivando atingir os parâmetros típicos reportados na literatura das estrelas supermassivas. Desta forma, um primeiro resultado do projeto foi a obtenção de espectros teóricos típicos desses objetos.

Apresentamos e analisamos a morfologia dos espectros obtidos desde o ultravioleta distante até o infravermelho médio ( $1000\text{\AA} - 30 \mu\text{m}$ ). Até o momento, trabalhos na literatura não consideraram o infravermelho em detalhes como em nosso projeto. As principais linhas espectrais de diversos elementos (H, He, CNO) foram identificadas, o que pode ser útil em estudos posteriores. Os modelos desenvolvidos com esse trabalho podem ser ainda usados como ponto de partida em futuras observações de estrelas supermassivas (p.e., com o telescópio Hubble ou o James Webb).

**Palavras-chave:** Astrofísica Estelar; Estrelas Supermassivas; CMFGEN; Espectroscopia; Modelos de Atmosferas.

# Abstract

Massive stars (mass  $M \gtrsim 8 M_{\odot}$ ) have extreme characteristics compared to low-mass stars. They reach surface temperatures of up to about 50000 K and reach luminosities of up to  $10^6 L_{\odot}$ . They have very strong stellar winds (mass loss rate of the order of  $10^{-5} M_{\odot}/\text{year}$ ) and very intense ionizing fluxes, considerably influencing their surroundings. Furthermore, they end their lives as extreme objects, such as supernovae, neutron stars or black holes. These stars therefore have a fundamental role in different areas of Astrophysics.

Until recently, it was believed to be physically impossible for a star to have a mass greater than about 150 times the mass of the Sun ( $150 M_{\odot}$ ). However, recent observations with the Hubble telescope suggest the existence of stars with masses up to  $300 M_{\odot}$ . Stars with masses greater than  $100 M_{\odot}$  are currently called supermassive stars. The feedback from these stars to the surrounding environment is significant, but is ignored in certain models of "starbursts" galaxies (galaxies with high star formation).

The aim of this work is to study the spectral properties of supermassive stars. To do that, we use sophisticated models that describe the radiative transport in an expanding atmosphere with the CMFGEN code. The analysis started with some supergiant star models (e.g., Zeta Puppis), with masses between  $50 - 60 M_{\odot}$ . The mass and other parameters were gradually increased in order to reach the typical parameters reported in the supermassive stars literature. Thus, as first result of this project, we obtained models for typical supermassive star spectra.

We present and analyze the morphology of selected spectra from far ultraviolet to mid-infrared ( $1000\text{\AA} - 30 \mu\text{m}$ ). So far, works in the literature do not consider the infrared region in detail as in our project. The main spectral lines of various elements (H, He, CNO) were identified, which can be of interest for future studies. The models developed with this work can also be used as a starting point for future observations of supermassive stars, e.g., with the Hubble or the James Webb Space Telescope.

**Keywords:** Stellar Astrophysics; Supermassive Stars; CMFGEN; Spectroscopy; Atmosphere Models.

*Este trabalho é dedicado aos meu pais, cujo apoio foi fundamental para que eu chegasse até aqui.*

# Lista de abreviaturas e siglas

☉	Subscrito que indica unidade solar
CMFGEN	Co-Moving Frame Generator
IMF	Função de Massa Inicial, do inglês Initial Mass Function
IR	Infravermelho (região do espectro eletromagnético), do inglês Infrared
JWST	Telescópio Espacial James Webb, do inglês James Webb Space Telescope
LMC	Grande Nuvem de Magalhães, do inglês Large Magellanic Cloud
UV	Ultravioleta (região do espectro eletromagnético)

# Lista de ilustrações

Figura 1	– Região central da Nebulosa da Tarântula na Grande Nuvem de Magalhães - O aglomerado R136 pode ser visto na parte inferior da imagem, à direita (Fonte: HubbleSite.org). . . . .	13
Figura 2	– Comparação entre o espectro observado do aglomerado #5 no núcleo da NGC 5253 com o espectro observado do aglomerado R136a (Smith et al. 2016). . . . .	14
Figura 3	– Espectro de uma estrela supermassiva localizada no aglomerado R136 (em preto). O espectro teórico é mostrado em vermelho (Crowther et al. 2010). . . . .	15
Figura 4	– Comparação entre o espectro do modelo da estrela supermassiva com o espectro observado da estrela R136a2. Na região entre 1200-1250 Angstrom (aproximadamente) as linhas de emissão não estão presentes no espectro observado devido às absorções do meio interestelar. . . . .	18
Figura 5	– Comparação entre o espectro do modelo da estrela supermassiva com o espectro teórico da Zeta Puppis, cujo modelo foi utilizado como ponto de partida para a obtenção do espectro da supermassiva. Para melhor visualização, os gráficos foram feitos intencionalmente em escalas diferentes. . . . .	19
Figura 6	– Reconhecimento das principais linhas espectrais presentes na região do ultravioleta no espectro teórico típico de uma estrela supermassiva. Há predominância de elementos mais pesados que o hidrogênio e o hélio nessa região. . . . .	21
Figura 7	– Contribuição do Si IV na região ultravioleta do espectro. A linha Si IV 1400Å é relativamente forte, mas no espectro total ela se encontra ausente. . . . .	22
Figura 8	– Si IV apresentado junto ao Fe VI na região ultravioleta do espectro. A linha de Si IV está presente do mesmo jeito que ela aparece quando apresentada individualmente. . . . .	23
Figura 9	– Si IV apresentado junto ao o Fe V na região ultravioleta do espectro. A linha de Si IV aparece, mas com intensidade consideravelmente reduzida. . . . .	24
Figura 10	– Reconhecimento das principais linhas espectrais presentes na região do óptico no espectro teórico típico de uma estrela supermassiva. Há predominância de linhas de hidrogênio e hélio. . . . .	26



- Figura 11 – Reconhecimento das principais linhas espectrais presentes na região do infravermelho próximo no espectro teórico típico de uma estrela supermassiva. Há total predominância das linhas de hidrogênio e hélio. 28
- Figura 12 – Reconhecimento das principais linhas espectrais presentes na região do infravermelho médio no espectro teórico típico de uma estrela supermassiva. Há total predominância das linhas de hidrogênio e hélio. . . . 30

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação entre os parâmetros do modelo da Zeta Puppis, modelo da VMS e da estrela R136a2 . . . . .	18
Tabela 2 – Comprimentos de onda das linhas espectrais reconhecidas na região do ultravioleta . . . . .	20
Tabela 3 – Comprimentos de onda das linhas espectrais reconhecidas na região do óptico . . . . .	25
Tabela 4 – Comprimentos de onda das linhas espectrais reconhecidas na região do infravermelho próximo . . . . .	27
Tabela 5 – Comprimentos de onda das linhas espectrais reconhecidas na região do infravermelho médio . . . . .	29

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	12
1.1	Estrelas Massivas e Supermassivas . . . . .	12
1.2	Definição e Evidências de Estrelas Supermassivas . . . . .	12
1.3	Consequências da Existência de Estrelas Supermassivas . . . . .	14
1.4	Objetivos . . . . .	15
2	METODOLOGIA E RESULTADOS . . . . .	16
2.1	Funcionamento do CMFGEN . . . . .	16
2.2	Zeta Puppis e Modelos Teóricos . . . . .	17
2.3	Parâmetros Físicos . . . . .	17
2.4	Resultados . . . . .	18
2.5	Região do Ultravioleta . . . . .	20
2.6	Ausência do Si IV na Região do Ultravioleta . . . . .	22
2.7	Região do Óptico . . . . .	25
2.8	Região do Infravermelho . . . . .	27
3	CONCLUSÕES . . . . .	31
	REFERÊNCIAS . . . . .	33

# 1 Introdução

## 1.1 Estrelas Massivas e Supermassivas

Estrelas massivas (massa  $M \gtrsim 8 M_{\odot}$ ) queimam elementos mais pesados que o carbono ao longo de suas vidas, e, conseqüentemente, têm grande importância na evolução química do meio interestelar e das galáxias. Também apresentam altas temperaturas (que podem ultrapassar os 25000K), resultando em intensos fluxos ionizantes. Elas também possuem ventos estelares muito fortes (p.e., taxas de  $\sim 10^{-8} - 10^{-5} M_{\odot}/\text{ano}$ ), depositando portanto energia mecânica e momento nos seus arredores.

Estrelas supermassivas apresentam fluxos ionizantes e ventos estelares ainda mais intensos, então o feedback dessas estrelas ao meio interestelar é ainda maior. No entanto, modelos de síntese de populações estelares, por exemplo, não consideram até hoje essas estrelas. É crucial que esses modelos sejam estendidos para o regime de supermassivas para que o feedback químico, radiativo e mecânico das estrelas não seja subestimado (Smith et al. 2016).

Esses fatos indicam a importância em estudar as estrelas supermassivas, que é um tópico recente na astrofísica. Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo analisar o espectro típico de uma estrela supermassiva, identificando suas principais linhas espectrais a partir de um modelo teórico.

## 1.2 Definição e Evidências de Estrelas Supermassivas

Estrelas com massas iguais ou superiores a  $100 M_{\odot}$  são definidas como estrelas supermassivas (Vink et al. 2012). Essa definição pragmática foi adotada, pois não depende do modelo considerado.

Até pouco tempo acreditava-se em um limite superior de  $150 M_{\odot}$  para a massa de estrelas (Figer 2005), mas não há evidência empírica para a determinação desse limite e hoje já existem evidências observacionais de estrelas com massas que ultrapassam esse número.

O jovem e denso aglomerado estelar R136 localizado na Grande Nuvem de Magalhães (LMC), por exemplo, contém centenas de jovens estrelas, que estão entre as mais massivas detectadas no universo até o momento (veja a Figura 1). Astrônomos utilizando

o Telescópio Espacial Hubble puderam realizar um estudo espectroscópico detalhado da região central deste aglomerado. Quatro estrelas com massas excedendo o limite de  $150 M_{\odot}$  foram encontradas. Essas estrelas apresentam massas iniciais entre  $165M_{\odot}$  e  $320M_{\odot}$  (Crowther et al. 2010).



Figura 1 – Região central da Nebulosa da Tarântula na Grande Nuvem de Magalhães - O aglomerado R136 pode ser visto na parte inferior da imagem, à direita (Fonte: HubbleSite.org).

Outra evidência de que as estrelas supermassivas de fato existem é o estudo espectroscópico no óptico e ultravioleta realizado no aglomerado #5 no núcleo da galáxia NGC 5253<sup>1</sup>. Nesse aglomerado, foi detectado que suas características espectrais (ampla emissão de HeII  $\lambda 1640$ , emissão de CIV P Cygni e ausência de SiIV P Cygni) são compatíveis com uma função de massa acima de  $100 M_{\odot}$  e com idade muito jovem (menor que  $2 \times 10^6$  anos). Também foi detectado que o espectro ultravioleta da região #5 é extremamente similar ao espectro integrado do aglomerado R136a (ver Figura 2), que contém 6 supermassivas, confirmando que esses objetos estão presentes no aglomerado (Smith et al. 2016).

<sup>1</sup> uma galáxia irregular na constelação do Centauro, a cerca de 3 Mpc de distância.

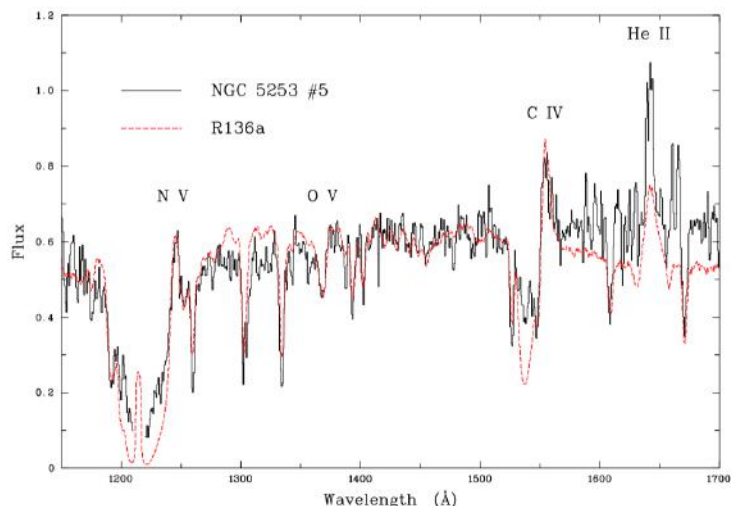


Figura 2 – Comparação entre o espectro observado do aglomerado #5 no núcleo da NGC 5253 com o espectro observado do aglomerado R136a (Smith et al. 2016).

### 1.3 Consequências da Existência de Estrelas Supermassivas

A existência de estrelas supermassivas resulta em consequências importantes de serem discutidas, pois esses objetos provavelmente dominam a injeção de energia no Universo (tanto por ventos estelares, quanto por radiação) e seu feedback é relevante demais para ser ignorado. Porém, ainda conhecemos pouco sobre esse tópico e há muito o que ser estudado sobre a formação, evolução e destino das supermassivas.

Aparentemente não há motivos para acreditar que o processo de formação de estrelas supermassivas seja fundamentalmente diferente das estrelas massivas com massas abaixo de  $100 M_{\odot}$ . Como os modelos teóricos modernos removeram os obstáculos (fragmentação, binariedade e pressão de radiação) para que a formação de estrelas massivas aconteça de forma semelhante às menos massivas (por acreção, no interior de nuvens moleculares), acredita-se que não há necessidade de recorrer a processos exóticos como colisões estelares para explicar a existência desses objetos (Vink et al. 2012). Então, acredita-se que não é necessário tratar a formação de supermassivas como um tópico separado, mas sim incluí-las no objetivo de formar o limite superior para a função de massa inicial (IMF).

Sobre a evolução de estrelas supermassivas ainda existem muitas dúvidas. Alguns obstáculos para um perfeito entendimento sobre como essa evolução funciona já são familiares, pois coincidem com o estudo de estrelas de alta massa de uma forma geral (como as taxas de perda de massa evoluem, rotações e evolução binária). Esse conhecimento é importante, pois ajudaria a entender como as supermassivas terminam suas vidas (quais delas explodirão, quais tornam-se buracos negros), pois o fator chave para determinar o destino final de uma estrela é a sua massa no momento da sua morte. O destino de estrelas

de alta massa é importante para entendermos o enriquecimento químico do Universo.

Estrelas supermassivas é um tópico recente de estudo na astrofísica e é um tema de grande importância e de futuro promissor. Na próxima seção será apresentado o objetivo deste trabalho.

## 1.4 Objetivos

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é obter um modelo de atmosfera sofisticado de uma estrela supermassiva e analisar seu espectro, fazendo o reconhecimento das principais linhas presentes (no UV, óptico e infravermelho). O espectro das supermassivas apresenta diferenças consideráveis em relação às estrelas massivas tradicionais e foi muito pouco estudado até o momento.

Atualmente é possível encontrar espectros teóricos e observados na literatura, porém esses estudos não analisam detalhadamente o espectro, fazendo o reconhecimento das principais linhas, por exemplo (ver Figura 3). Além disso, o infravermelho nunca foi mostrado em detalhes. Essa região é de grande interesse, principalmente tendo em vista o lançamento do telescópio James Webb, previsto ainda para esse ano.

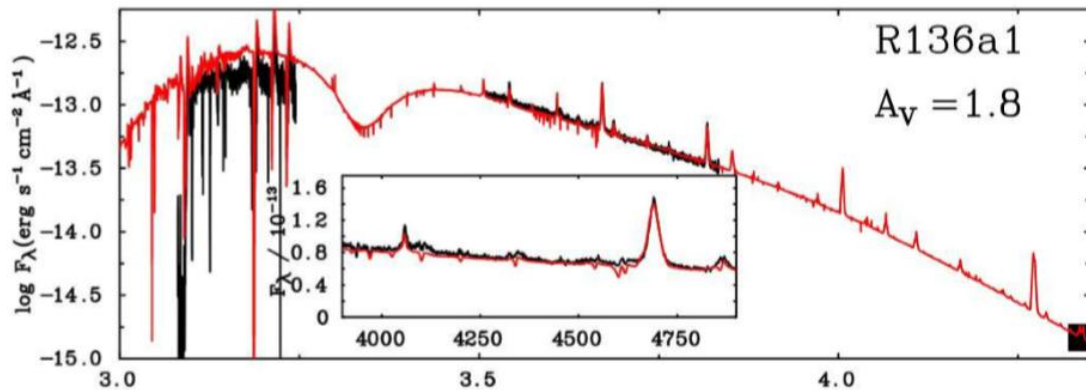


Figura 3 – Espectro de uma estrela supermassiva localizada no aglomerado R136 (em preto). O espectro teórico é mostrado em vermelho (Crowther et al. 2010).

No próximo capítulo discutimos a metodologia utilizada neste trabalho.

## 2 Metodologia e Resultados

A principal ferramenta utilizada foi o código CMFGEN (Hillier & Miller 1998). Ele foi usado para criar todos os espectros teóricos das estrelas do presente projeto. O CMFGEN foi escolhido por possibilitar a criação de modelos satisfatórios, considerados estado-da-arte na área, sendo constantemente utilizado na literatura.

A linguagem de programação Python foi utilizada para gerar as figuras que apresentam os espectros obtidos com o CMFGEN. O sistema operacional utilizado foi o Linux Ubuntu 16.04.

### 2.1 Funcionamento do CMFGEN

O CMFGEN resolve a interação da radiação com a matéria em um fluido em expansão, ou seja, um vento estelar. Esta é uma situação típica encontrada na atmosfera de estrelas supermassivas. O código trata a física atômica de maneira realística, permitindo a inclusão de diversos elementos como: H, He, C, N, O, Ar, Al, Ne, Mg, Ca, Si, S, P, Fe, Ni, Mn, Cr e Co.

O CMFGEN recebe parâmetros de entrada para calcular um modelo de atmosfera, p.e.: massa, temperatura, luminosidade, raio e taxa de perda de massa. O código resolve a equação de transporte radiativo em geometria esférica, no referencial co-móvel com o fluido em expansão. Essa equação é resolvida simultaneamente com as equações de equilíbrio radiativo e estatístico (situação não-ETL). Posteriormente, um código auxiliar é utilizado para calcular o espectro no referencial do observador (`cmf_flux.exe`).

Uma solução consistente para as equações é obtida através de iterações. Correções para a temperatura e níveis populacionais são feitas em cada iteração pela linearização de todas as equações. A convergência do código após essas iterações é muito sensível aos parâmetros de entrada, que precisam variar lentamente para que o código convirja, aumentando consideravelmente o tempo computacional necessário para a realização do estudo presente neste trabalho de conclusão de curso.



## 2.2 Zeta Puppis e Modelos Teóricos

Para obter um modelo de atmosfera para uma estrela supermassiva, escolhemos partir de um modelo de estrela massiva com massa de cerca de  $50 M_{\odot}$ . Utilizamos um modelo CMFGEN já obtido anteriormente para a estrela Zeta Puppis, uma supergigante do tipo O4. Os parâmetros físicos foram então alterados gradualmente a cada novo modelo calculado. Uma variação pequena foi necessária para que o código convergisse, em geral menor que 30% para cada parâmetro (massa, temperatura, luminosidade e raio).

No total, 40 modelos foram gerados até que um modelo satisfatório para uma estrela supermassiva fosse obtido. Por satisfatório, queremos dizer com espectro UV teórico com as mesmas principais linhas espectroscópicas observadas, conforme mostraremos adiante. Essa etapa do estudo exigiu um grande esforço computacional, uma vez que um modelo típico requer cerca de 4GB RAM para funcionamento e muitas horas para convergência. Somando todos os modelos, o código rodou no computador por 1920 horas.

A partir de nosso modelo final, foi possível fazer o reconhecimento das linhas espectrais presentes no espectro, não só no ultravioleta, mas também no óptico, infravermelho próximo e médio. O próprio CMFGEN fornece meios para que isso seja feito. O espectro pode ser recalculado para cada elemento e íon, separadamente ou em conjuntos com outros (p.e., He I-II ou somente C IV).

## 2.3 Parâmetros Físicos

Para a obtenção de um modelo típico que representa uma atmosfera de uma estrela supermassiva, os parâmetros do modelo da estrela Zeta Puppis foram alterados até ficarem próximos aos da estrela R136a2, do aglomerado R136. A R136a2 foi escolhida de forma arbitrária. Seus parâmetros físicos foram apresentados por Crowther et al. (2010), ao estudar o aglomerado R136.

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre os parâmetros físicos do modelo da Zeta Puppis, do modelo da VMS e da estrela R136a2. Nas próximas seções apresentaremos os resultados obtidos a partir do estudo morfológico do espectro gerado pelo CMFGEN.

Tabela 1 – Comparação entre os parâmetros do modelo da Zeta Puppis, modelo da VMS e da estrela R136a2

Parâmetro	Zeta Puppis	VMS	R136a2
Massa ( $M/M_{\odot}$ )	47	219	240
$T_{\text{eff}}$ (K)	41000	50000	52000 +- 3000
$\text{Log}(L/L_{\odot})$	5.92	6.53	6.78 +- 0.09
Raio ( $R/R_{\odot}$ )	18.25	24.73	29.5
$\dot{M}$ ( $M_{\odot}/\text{yr}$ )	1.9e-6	4.4e-5	4.6e-5

## 2.4 Resultados

Com a obtenção do modelo com os parâmetros desejados, foi possível analisar o espectro em diferentes regiões com o objetivo de reconhecer as principais linhas espectrais. Na Figura 4, o espectro teórico obtido foi apresentado junto ao espectro observado da estrela supermassiva R136a2 (dados do Telescópio Espacial Hubble). O objetivo foi obter o espectro teórico típico de uma supermassiva e não modelar uma estrela específica, então o resultado encontrado nessa comparação apresentada na figura foi considerado satisfatório. Por exemplo, as linhas P-Cygni mais intensas presentes no espectro observado após 1500 Å, típicas das estrelas supermassivas, também estão presentes no espectro teórico. Iremos identificá-las mais adiante.

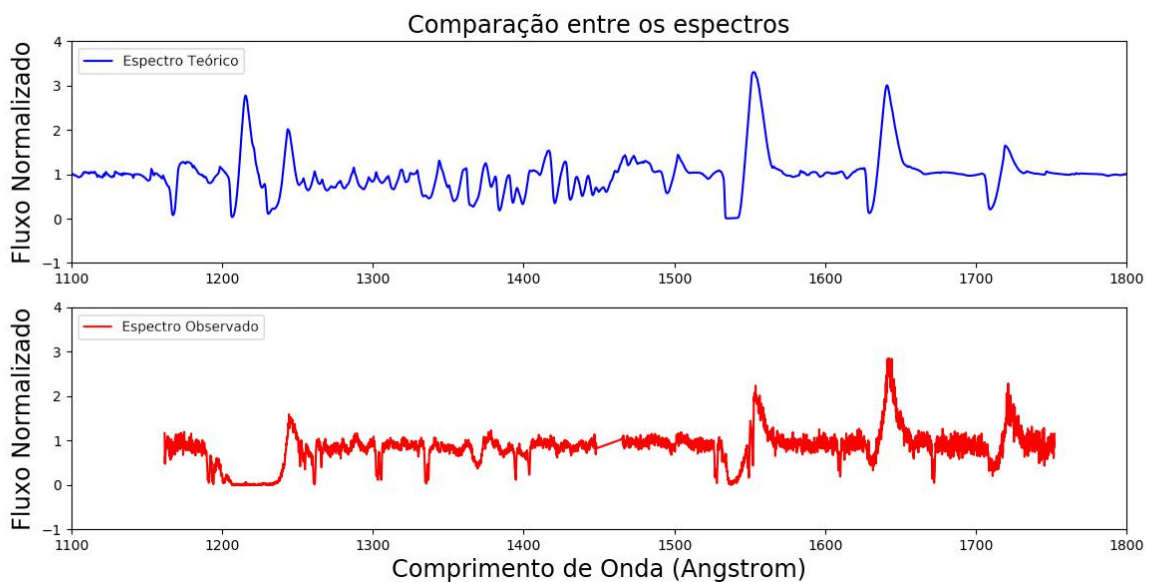


Figura 4 – Comparação entre o espectro do modelo da estrela supermassiva com o espectro observado da estrela R136a2. Na região entre 1200-1250 Angstrom (aproximadamente) as linhas de emissão não estão presentes no espectro observado devido às absorções do meio interestelar.

Ressaltamos que abaixo de  $1250\text{\AA}$  o espectro observado é fortemente influenciado pela absorção interestelar. Assim, as linhas teóricas previstas não estão presentes. Analogamente, algumas linhas do meio interestelar estão presentes no espectro observado como estreitas absorções em outros comprimentos de onda (p.e., perto de  $1300\text{\AA}$ ). Tais absorções não são levadas em conta em nossos modelos de atmosferas. Um tratamento detalhado desses efeitos está fora do escopo de nosso trabalho.

Também foi realizada uma comparação entre os espectros da estrela supermassiva e a estrela Zeta Puppis com o objetivo de mostrar como os espectros são morfologicamente distintos. Mostramos o resultado na Figura 5, na região do óptico. As escalas do gráfico estão diferentes para melhor visualização, pois a intenção é apenas mostrar essa diferença considerável que existe na morfologia desses espectros.

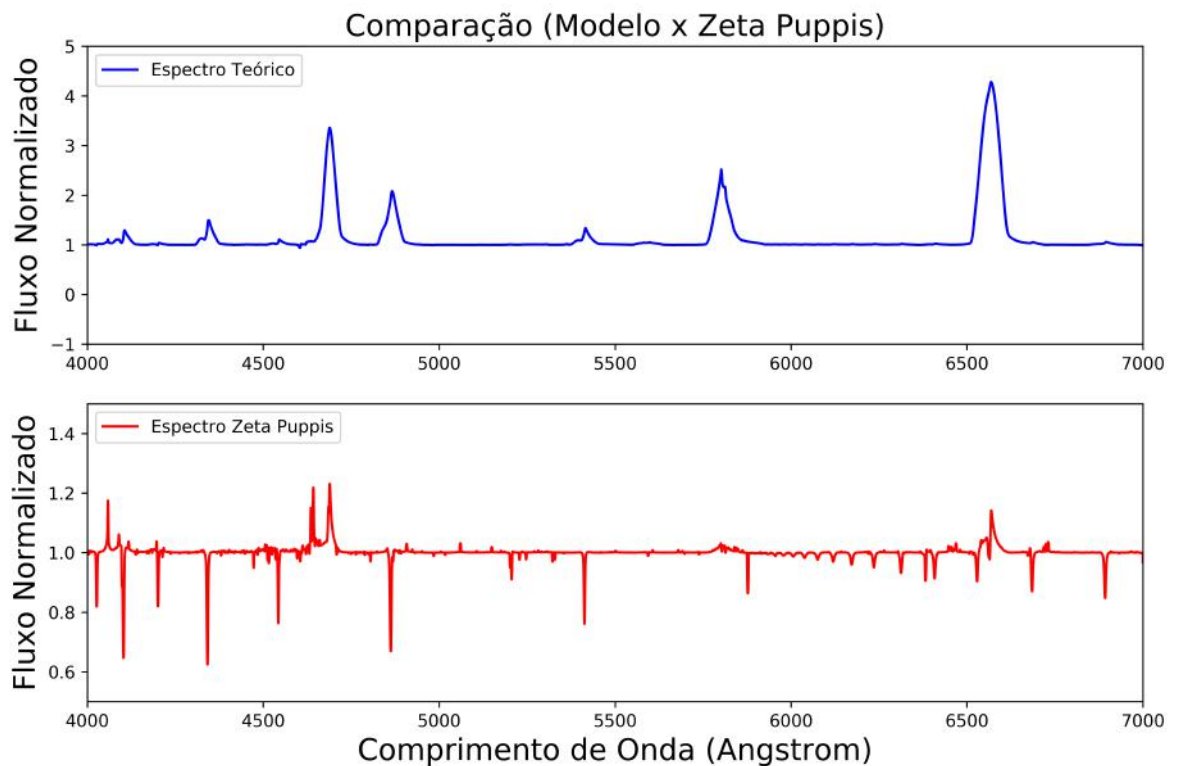


Figura 5 – Comparação entre o espectro do modelo da estrela supermassiva com o espectro teórico da Zeta Puppis, cujo modelo foi utilizado como ponto de partida para a obtenção do espectro da supermassiva. Para melhor visualização, os gráficos foram feitos intencionalmente em escalas diferentes.

É evidente que no espectro da estrela supermassiva as linhas de emissão são predominantes, enquanto que no espectro da Zeta Puppis as linhas de absorção predominam. A razão de tal fato é que a taxa de perda de massa da estrela supermassiva é muito maior que a da Zeta Puppis (veja a Tabela 1). O vento é tão denso que nenhuma linha fotosférica é vista.

A seguir será apresentada a identificação das principais linhas espectrais em cada região do espectro teórico do modelo da estrela supermassiva. Para fazer essa identificação, foi necessário usar o código CMFGEN para calcular o espectro de cada íon individualmente. Posteriormente, esse espectro foi sobreposto ao espectro total, i.e., com todas as linhas. Nas figuras a seguir as linhas fracas não serão consideradas, mas apenas as principais, mais intensas. A caracterização de todas as linhas é um esforço que vai além do escopo do presente projeto.

## 2.5 Região do Ultravioleta

A região do ultravioleta é dominada por elementos mais pesados que o hidrogênio e o hélio. No espectro de estrelas supermassivas, há uma característica importante citada com frequência na literatura por estar presente em seus espectros típicos, a ausência de emissão do Si IV 1400. Esse fato foi investigado neste trabalho e as conclusões encontradas serão apresentadas na próxima seção. Apresentamos o espectro UV na Figura 6. A identificação dos íons responsáveis pelas principais características é mostrada e os respectivos comprimentos de onda estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Comprimentos de onda das linhas espectrais reconhecidas na região do ultravioleta

Íon	Comprimento de onda (Å)
O VI	1032-1038
N IV	1036
H I	1216
N V	1239-1243
C IV	1548-1551
He II	1640
N IV	1719
He II	2733
He II	3203
O IV	3404-3414

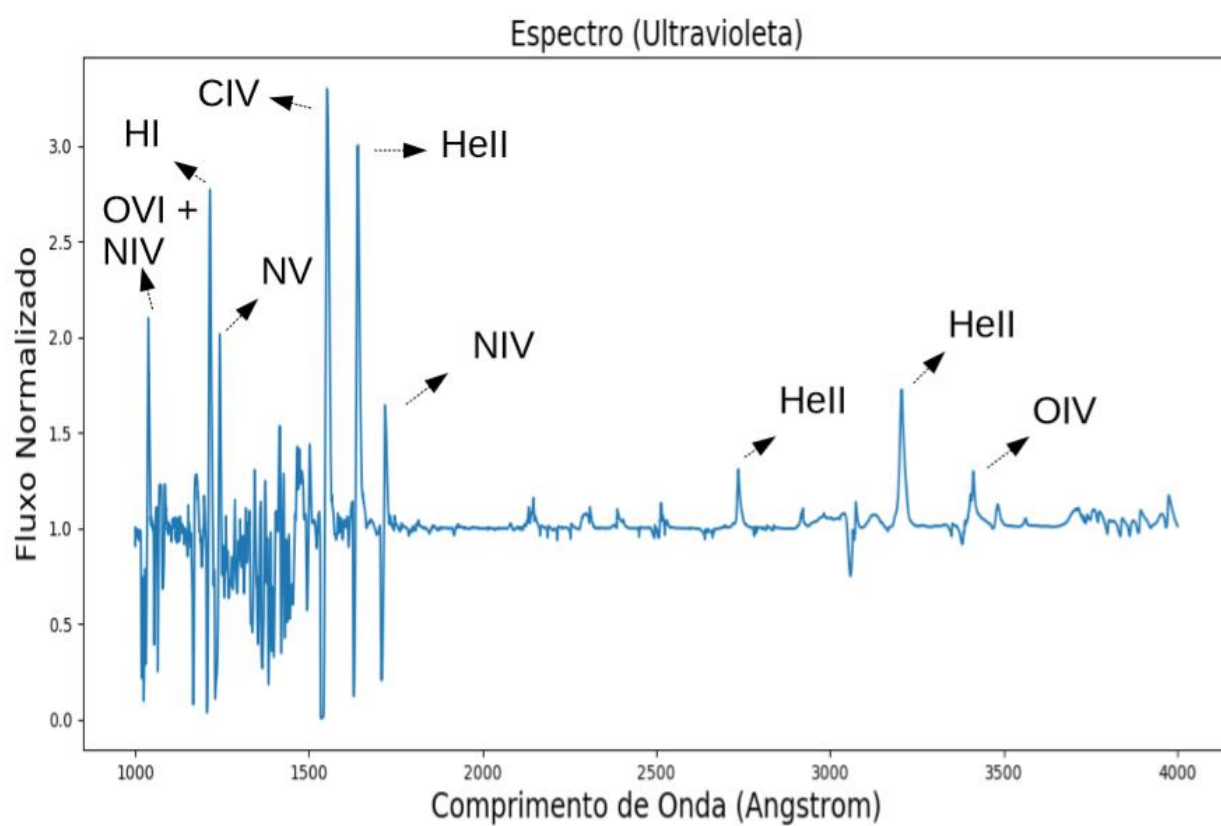


Figura 6 – Reconhecimento das principais linhas espectrais presentes na região do ultravioleta no espectro teórico típico de uma estrela supermassiva. Há predominância de elementos mais pesados que o hidrogênio e o hélio nessa região.

## 2.6 Ausência do Si IV na Região do Ultravioleta

A ausência, ou baixa intensidade, da linha de Si IV 1400 na região ultravioleta é uma característica marcante do espectro típico das estrelas supermassivas. Porém, quando essa linha é calculada individualmente, ela aparece nessa região do espectro.

A Figura 7 apresenta a linha de Si IV calculada individualmente na região ultravioleta. Para investigar o que ocorre nessa região, a linha de Si IV foi calculada junto com a linha dos outros elementos que aparecem no espectro, um par por vez, com o objetivo de identificar qual linha está cancelando o Si IV.

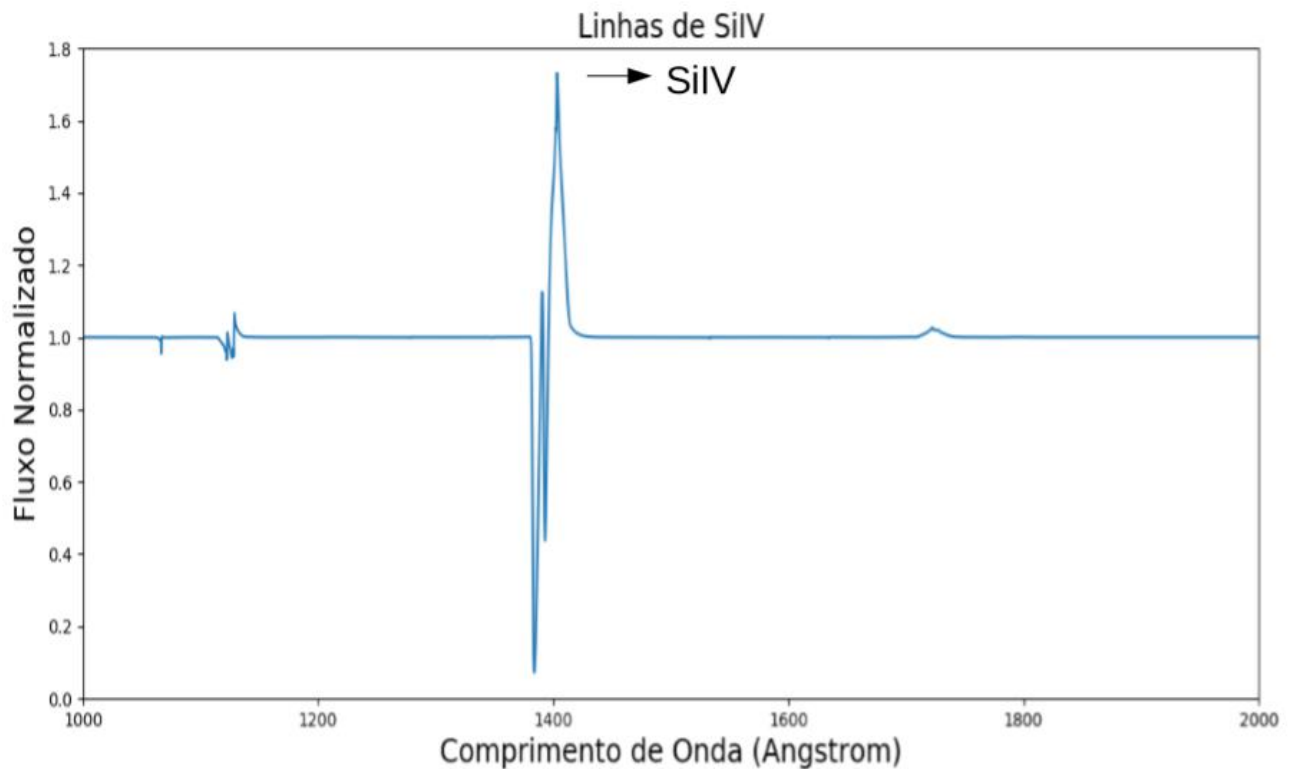


Figura 7 – Contribuição do Si IV na região ultravioleta do espectro. A linha Si IV 1400Å é relativamente forte, mas no espectro total ela se encontra ausente.

A Figura 8 apresenta o Si IV calculado junto com o Fe VI para exemplificar o que ocorre na maioria dos casos encontrados, as linhas de ambos os elementos aparecem normalmente no espectro. Poderíamos ter apresentado o Si IV calculado com qualquer outro elemento que apareça nessa região (com exceção do Fe V como será explicado a seguir), o objetivo foi apenas mostrar que a contribuição do Si IV não foi afetada nesse caso, nossa escolha pelo Fe VI foi arbitrária.

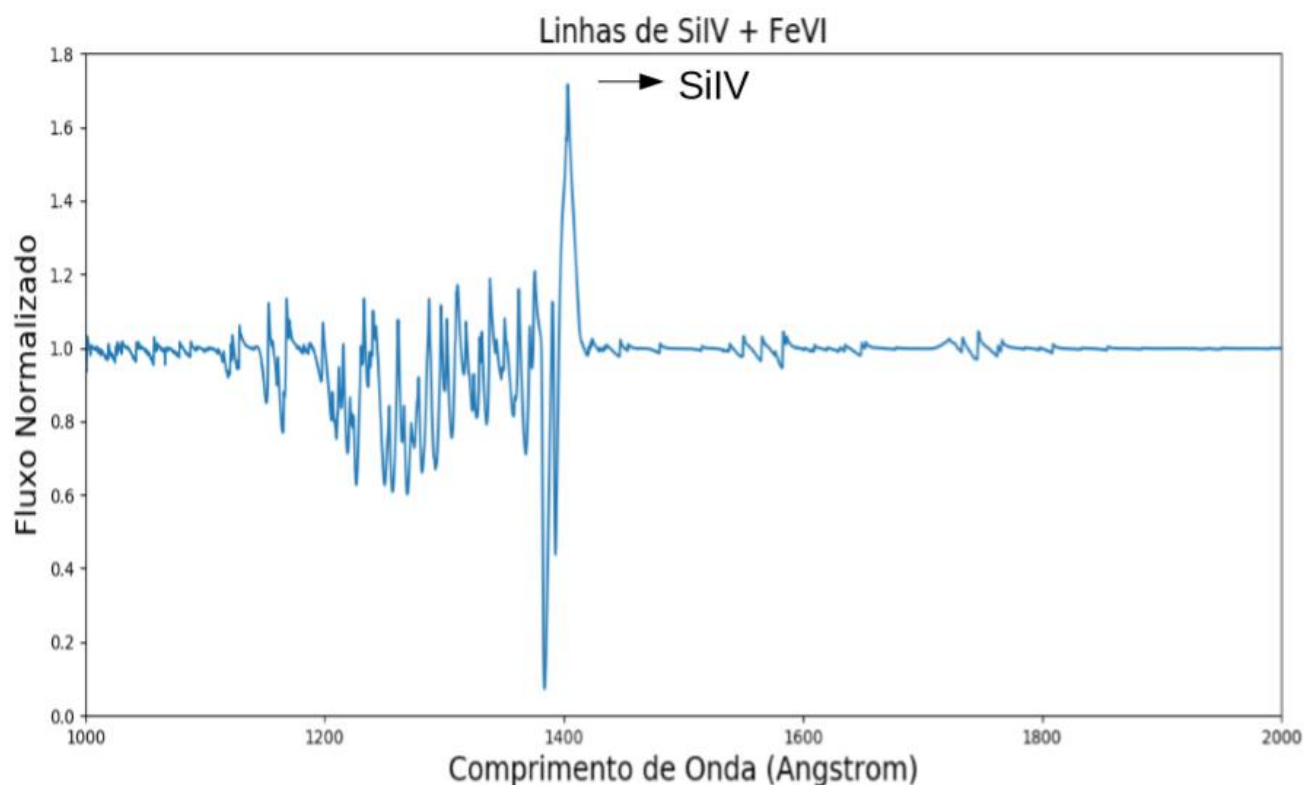


Figura 8 – Si IV apresentado junto ao Fe VI na região ultravioleta do espectro. A linha de Si IV está presente do mesmo jeito que ela aparece quando apresentada individualmente.

A Figura 9 apresenta o Si IV calculado junto com o Fe V. Nesse caso, a intensidade da linha de Si IV é reduzida consideravelmente. Podemos concluir que o motivo da linha de Si IV aparecer com baixa intensidade na região ultravioleta é que absorções de Fe V cancelam essa linha.

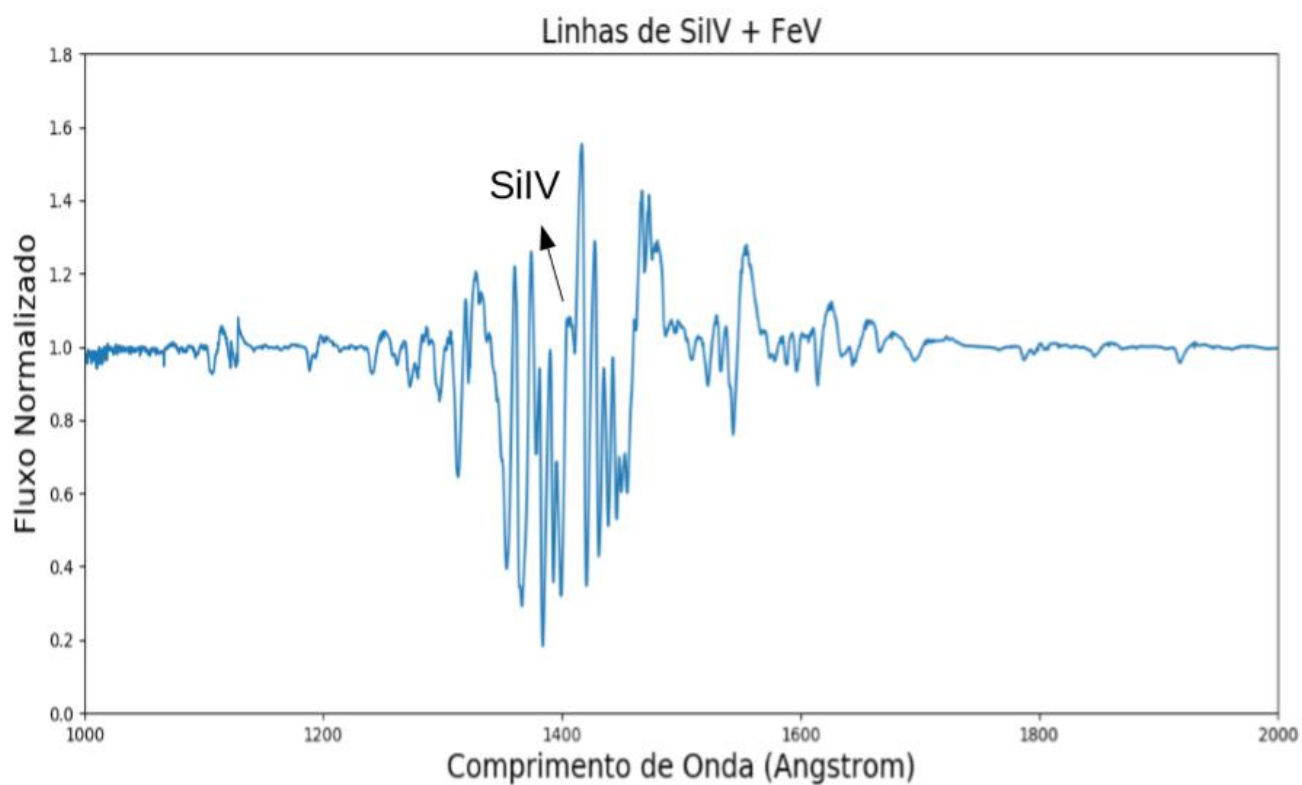


Figura 9 – Si IV apresentado junto ao o Fe V na região ultravioleta do espectro. A linha de Si IV aparece, mas com intensidade consideravelmente reduzida.



## 2.7 Região do Óptico

A região do óptico apresenta uma predominância de linhas de hidrogênio e hélio. No espectro de estrelas supermassivas também existe uma característica importante nessa região, a presença de uma intensa linha de  $H\alpha$ . A presença dessa linha pode ser observada na Figura 10 (6560 Å, aproximadamente). Os comprimentos de onda das linhas dos íons identificados na figura estão listados na Tabela 3.

Tabela 3 – Comprimentos de onda das linhas espectrais reconhecidas na região do óptico

Íon	Comprimento de onda (angstrom)
H I	4102
H I	4340
He II	4686
H I	4861
He II	5412
C IV	5801-5812
H I	6563
He II	6560

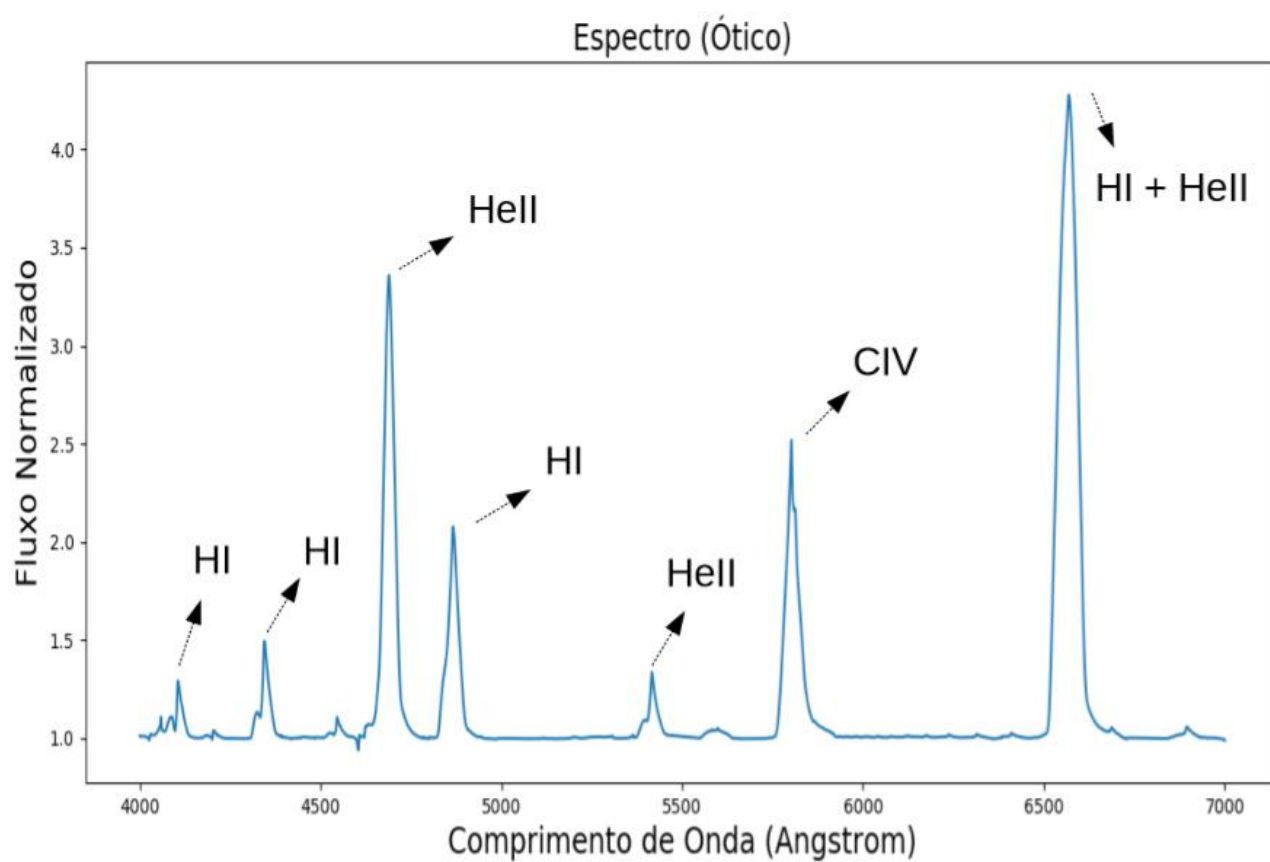


Figura 10 – Reconhecimento das principais linhas espectrais presentes na região do óptico no espectro teórico típico de uma estrela supermassiva. Há predominância de linhas de hidrogênio e hélio.

## 2.8 Região do Infravermelho

O espectro infravermelho de estrelas supermassivas nunca foi explorado. Ainda não existe espectro observado no infravermelho médio e uma análise detalhada do espectro teórico nessa região está sendo apresentada pela primeira vez neste trabalho de conclusão de curso.

O Telescópio Espacial James Webb (JWST) é otimizado para o infravermelho, então provavelmente será possível obter espectros no infravermelho médio quando ele for lançado. Logo, o estudo no infravermelho presente neste trabalho foi realizado tendo em vista o lançamento do JWST, previsto para o fim de 2021.

As Figuras 11 e 12 apresentam o espectro nas regiões do infravermelho próximo e infravermelho médio, respectivamente. Os comprimentos de onda das principais transições estão listados nas tabelas 4 e 5. Na região do infravermelho há predominância total de linhas de hidrogênio e hélio. Existem linhas de elementos mais pesados, mas aparecem com intensidades muito baixas.

Tabela 4 – Comprimentos de onda das linhas espectrais reconhecidas na região do infravermelho próximo

Íon	Comprimento de onda (microns)
He II	1.01
H I	1.09
He II	1.16
H I	1.28
He II	1.48
H I	1.82
He II	1.86
H I	1.88
H I	2.17
He II	2.22
H I	2.63
He II	2.62-2.64
He II	2.83

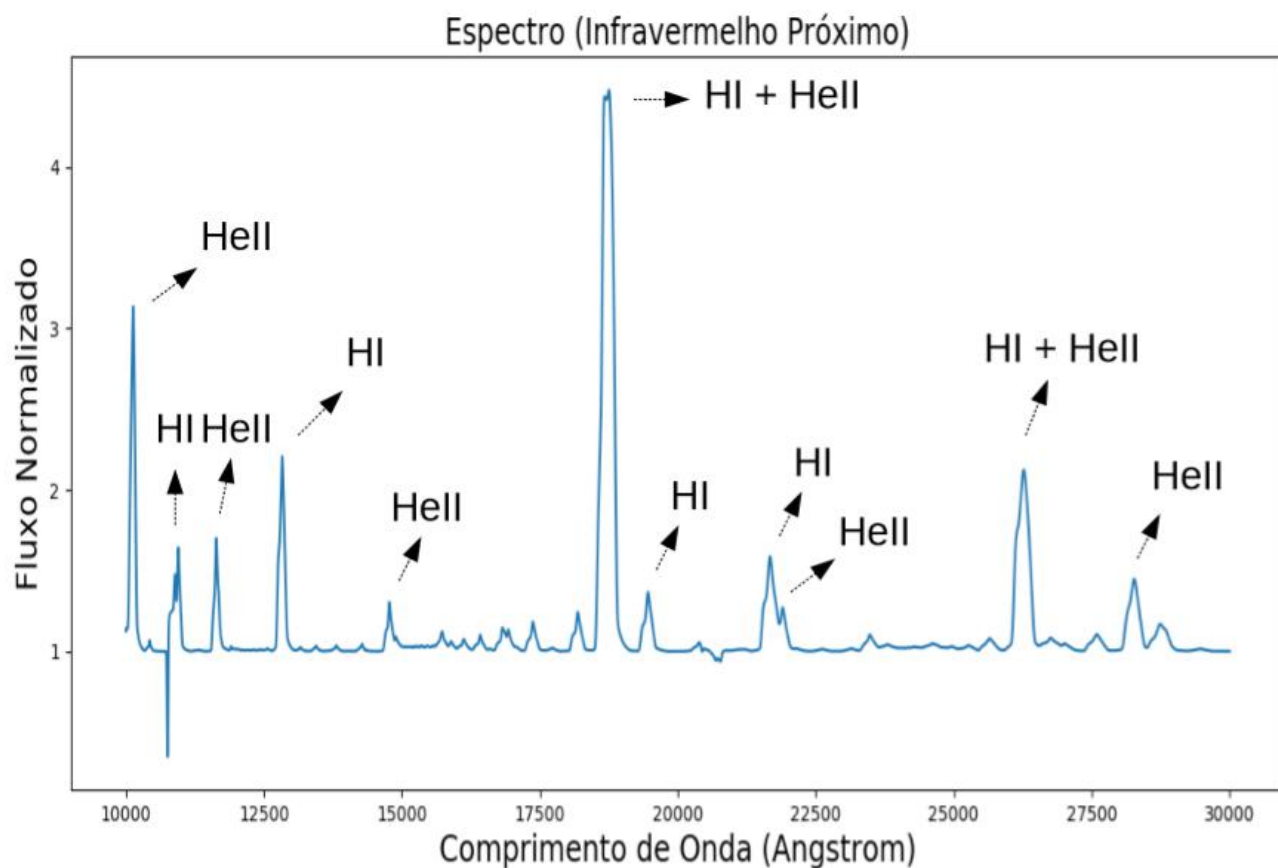


Figura 11 – Reconhecimento das principais linhas espectrais presentes na região do infravermelho próximo no espectro teórico típico de uma estrela supermassiva. Há total predominância das linhas de hidrogênio e hélio.

Tabela 5 – Comprimentos de onda das linhas espectrais reconhecidas na região do infravermelho médio

Íon	Comprimento de onda (microns)
H I	11.31
He II	11.30-11.33
H I	12.37-12.39
He II	12.36
He I	12.37-12.39
He II	12.58
H I	12.59
H I	16.21
He II	17.26
H I	19.06
He II	19.05-19.10
He I	19.00-19.09
H I	22.33-22.34
He II	22.03
He I	22.04
H I	27.80
He II	27.78-27.82
He I	27.79
H I	29.84

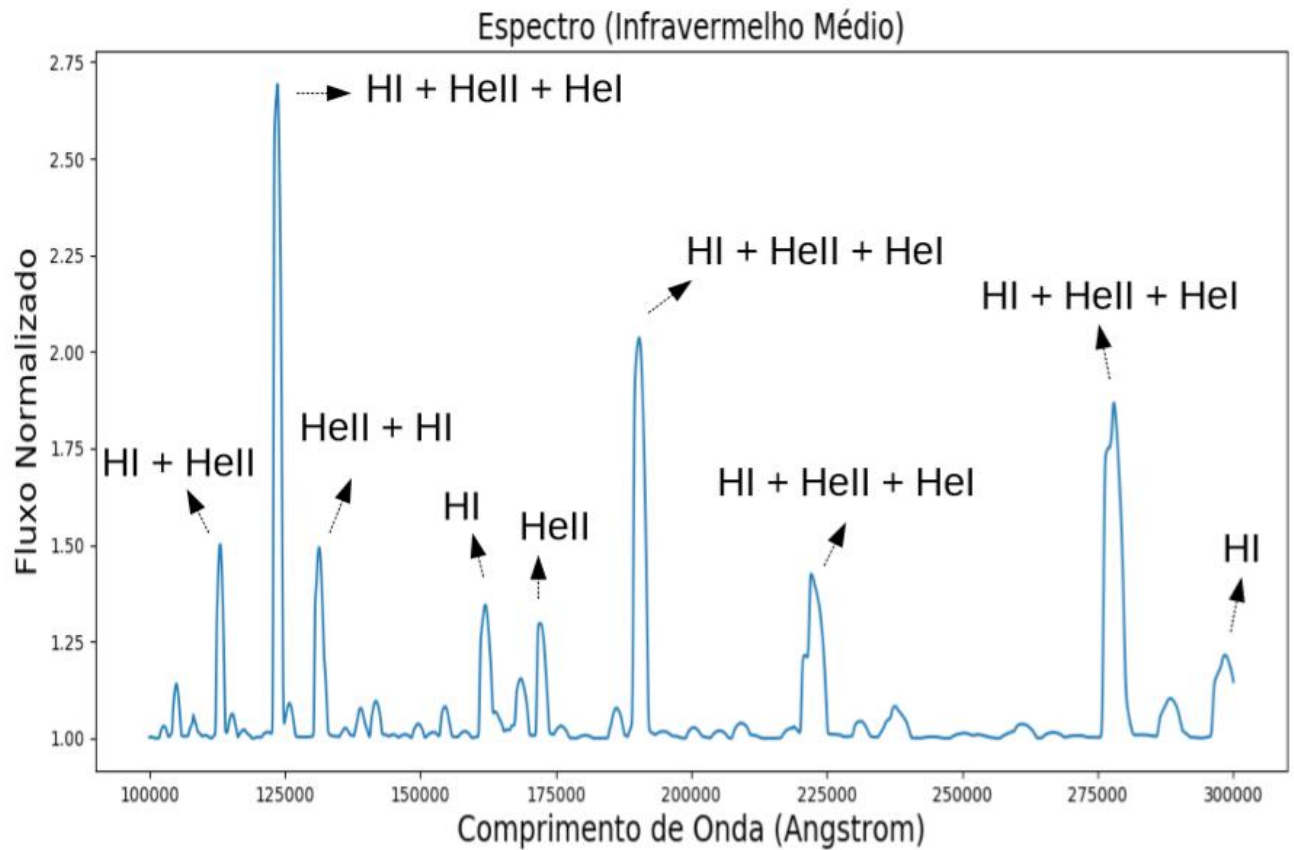


Figura 12 – Reconhecimento das principais linhas espectrais presentes na região do infravermelho médio no espectro teórico típico de uma estrela supermassiva. Há total predominância das linhas de hidrogênio e hélio.

Podemos dizer portanto que o espectro ultravioleta das estrelas supermassivas contém basicamente linhas de metais diversos, com assinaturas de vento clássicas (P-Cygni). Já no óptico e no infravermelho, as principais linhas encontradas no espectro são devidas ao hidrogênio e hélio. Em geral, todas as linhas estão em emissão e são formadas no vento estelar, devido a alta taxa de perda de massa.

## 3 Conclusões

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso foi estudar a morfologia do espectro de estrelas supermassivas em detalhes, destacando as principais linhas em diferentes regiões do espectro. Para atingir esse objetivo, foi necessário explorar a literatura sobre as estrelas massivas, supermassivas e estudar o que já foi publicado nessa área da astrofísica estelar. Também foi importante a familiarização com um código de atmosfera profissional, de ponta.

Para a realização desse estudo, foram criados modelos sofisticados de atmosferas com o uso do código CMFGEN (Hillier & Miller, 1998). Partindo do modelo de uma estrela massiva (Zeta Puppis, 47 massas solares), e variando gradualmente alguns dos parâmetros (temperatura, massa, raio, luminosidade) do modelo, foi possível alcançar os parâmetros típicos das supermassivas (encontrados na literatura).

Mais de 30 modelos intermediários foram criados, até chegar no modelo necessário para o prosseguimento do estudo. A partir do modelo foi possível obter e estudar características espectrais desde o ultravioleta até o infravermelho médio (aproximadamente  $900\text{\AA}$  -  $30\ \mu\text{m}$ ).

As principais linhas espectrais dos diversos elementos que aparecem nos espectros teóricos foram identificadas e foi feita uma comparação com um espectro observado de uma supermassiva, obtido com o Telescópio Espacial Hubble. O resultado dessa comparação foi considerado satisfatório.

A região do infravermelho médio foi analisada pela primeira vez neste trabalho. Um espectro teórico nessa região foi apresentado com suas principais linhas identificadas, o que é importante tendo em vista o lançamento do Telescópio Espacial James Webb.

Durante a análise das linhas espectrais, também foi possível explicar o motivo da linha de Si IV aparecer tão fraca na região do ultravioleta. Calculando a linha individualmente, foi possível confirmar que ela é forte e existe nessa região. No entanto, ao calcular a linha considerando os outros elementos, foi possível concluir que ela é cancelada por diversas absorções de Fe V.

O código CMFGEN e ferramentas básicas como a programação em Python permitiram um estudo interessante sobre a morfologia do espectro de estrelas supermassivas, possibilitando a apresentação de diversos gráficos nas diferentes regiões do espectro típico

desses objetos.

A partir deste trabalho é possível explorar outros tópicos pouco estudados sobre as estrelas supermassivas. Uma análise quantitativa dos fluxos ionizantes pelos quais esses objetos são responsáveis, por exemplo, pode ser feita em conjunto com a utilização do código de fotoionização Cloudy. O código Cloudy permite a obtenção das condições físico-químicas de uma nebulosa exposta a uma fonte externa de radiação (Ferland et al. 2013).



## Referências

CROWTHER, P. A.; CABALLERO-NIEVES, S. M.; BOSTROEM, K. A.; APELLÁNIZ, J. M.; SCHNEIDER, F. R. N.; WALBORN, N. R.; ANGUS, C. R.; BROTT, I.; BONANOS, A.; KOTER, A. de. The r136 star cluster dissected with hubble space telescope/stis. i. far-ultraviolet spectroscopic census and the origin of heii 1640 in young star clusters. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press (OUP), v. 458, n. 1, p. 624–659, 2016.

CROWTHER, P. A.; SCHNURR, O.; HIRSCHI, R.; YUSOF, N.; PARKER, R. J.; GOODWIN, S. P.; KASSIM, H. A. The r136 star cluster hosts several stars whose individual masses greatly exceed the accepted  $150 m_{\odot}$  stellar mass limit. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press (OUP), v. 408, n. 2, p. 731–751, 2010.

FERLAND, G. J.; PORTER, R. L.; HOOFF, P. A. M. van; WILLIAMS, R. J. R.; ABEL, N. P.; LYKINS, M. L.; SHAW, G.; HENNEY, W. J.; STANCIL, P. C. **The 2013 Release of Cloudy**. 2013.

FIGER, D. F. An upper limit to the masses of stars. **Nature**, Springer Science and Business Media LLC, v. 434, n. 7030, p. 192–194, 2005.

HILLIER, D. J.; MILLER, D. L. The treatment of non-lte line blanketing in spherically expanding outflows. **The Astrophysical Journal**, American Astronomical Society, p. 407–427, 1998.

SMITH, L. J.; CROWTHER, P. A.; CALZETTI, D.; SIDOLI, F. The very massive star content of the nuclear star clusters in ngc 5253. **The Astrophysical Journal**, American Astronomical Society, v. 823, n. 1, p. 38, 2016.

VINK, J. S.; HEGER, A.; KRUMHOLZ, M. R.; PULS, J.; BANERJEE, S.; CASTRO, N.; CHEN, K.-J.; CHENÈ, A.-N.; CROWTHER, P. A.; DAMINELLI, A. Very massive stars in the local universe. **Proceedings of the International Astronomical Union**, Cambridge University Press (CUP), v. 10, n. H16, p. 51–79, 2012.