

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
CURSO DE FÍSICA BACHARELADO

FLUTUAÇÕES DE TEMPERATURA
ELETRÔNICA EM REGIÕES HII:
O CASO DE 30 DORADUS REVISITADO

MONOGRAFIA

Guilherme Nunes Bremm

Santa Maria, RS, Brasil

2010

**FLUTUAÇÕES DE TEMPERATURA
ELETRÔNICA EM REGIÕES HII:
O CASO DE 30 DORADUS REVISITADO**

por

Guilherme Nunes Bremm

Monografia apresentada ao Curso de Física Bacharelado
da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS)
como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Física.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Fontana Copetti

Santa Maria, RS, Brasil

2010

©2010

Todos os direitos reservados a Guilherme Nunes Bremm. A reprodução de parte ou do todo deste trabalho só poderá ser realizada com autorização por escrito do autor.

Endereço: Laboratório de Análise Numérica e Astrofísica, Departamento de Matemática, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima, nº 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, CEP 97105-900.

Telefone: (0xx) 55 9972-6332

e-mail: g_n_bremm@ibest.com.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Naturais e Exatas
Curso de Física Bacharelado**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Monografia:

**FLUTUAÇÕES DE TEMPERATURA
ELETRÔNICA EM REGIÕES III:
O CASO DE 30 DORADUS REVISITADO**

elaborada por
Guilherme Nunes Bremm

como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Física

COMISSÃO EXAMINADORA:

Marcus Vinicius Fontana Copetti, Dr.
(Presidente/Orientador)

Rogemar André Riffel, Dr. (UFSM)

Vinicius de Abreu Oliveira, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 7 de Janeiro de 2010.

À memória de meu pai.

AGRADECIMENTOS

A todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho e/ou influenciaram em minha formação acadêmica, em particular

- ao professor Dr. Marcus V. F. Copetti, pela paciência e orientação;
- aos colegas de laboratório, Aline, Igor, Márcio e Vinicius pelas discussões e ajuda sempre que necessária;
- aos professores do curso de Física;
- ao CNPq pelo apoio financeiro.

*Devemos acreditar que temos
um dom para alguma coisa
e que, custe o que custar,
havemos de consegui-la.*

(Marie Curie)

RESUMO

Monografia
Curso de Física Bacharelado
Universidade Federal de Santa Maria

FLUTUAÇÕES DE TEMPERATURA ELETRÔNICA EM REGIÕES HII: O CASO DE 30 DORADUS REVISITADO

AUTOR: GUILHERME NUNES BREMM

ORIENTADOR: MARCUS VINICIUS FONTANA COPETTI

Local e Data da Defesa: Santa Maria, 7 de Janeiro de 2010.

Neste trabalho são apresentadas medidas de temperatura eletrônica na região HII 30 Doradus derivadas da razão $[OIII](\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363$. Foram obtidos dados espectrofotométricos de fenda longa de alta razão sinal ruído, na faixa de 3800 a 5100 Å, com o espectrógrafo Boller & Chivens acoplado ao telescópio de 1.52 m no Observatório Europeu do Sul, La Silla, Chile. O procedimento de redução e análise dos dados foi feito com o *software* IRAF. Obteve-se a temperatura em 140 aberturas, cada uma correspondendo a $2'' \times 1.64''$ no plano do céu. A distribuição de temperatura eletrônica apresentou uma média ponderada pelo fluxo de $H\beta$ de $9880 \pm 19K$, uma dispersão de 225 K e uma variância relativa à média de $t_s^2(OIII) = 0.00025$. Apesar deste valor estar de acordo com os modelos de fotoionização é insuficiente para explicar as discrepâncias entre as abundâncias obtidas via linhas de recombinação e de excitação colisional.

Palavras-chave: Regiões HII; 30 Doradus.

ABSTRACT

Monograph
Curso de Física Bacharelado
Universidade Federal de Santa Maria

ELECTRON TEMPERATURE FLUCTUATIONS IN HII REGIONS: THE 30 DORADUS CASE REVISITED

AUTHOR: GUILHERME NUNES BREMM
ADVISOR: MARCUS VINICIUS FONTANA COPETTI
Local and Date: Santa Maria, January 7th, 2010.

In this work are presented measurements of the electron temperature in the HII region 30 Doradus derived from the $[\text{OIII}](\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363$ ratio. Long-slit spectrophotometric data of high signal-to-noise, in the range of 3800 to 5100 Å, were obtained with a Boller & Chivens spectrograph attached to the 1.52 m telescope of the European Southern Observatory, La Silla, Chile. The data reduction and analysis procedure was done using the IRAF software. The temperature was obtained in 140 apertures, each one corresponding to $2'' \times 1.64''$ on the plane of sky. The electron temperature distribution presented a $H\beta$ flux weighted mean of $9880 \pm 19\text{K}$, a dispersion of 225 K and a variance relative to the mean of $t_s^2(\text{OIII}) = 0.00025$. Despite this value is in agreement with the photoionization models it is insufficient to explain the discrepancy between the abundances found by recombination and collisionally excited lines.

Key words: HII Regions; 30 Doradus.

Lista de Figuras

1.1	Diagrama dos níveis de energia do OIII.	17
1.2	Imagem de 30 Doradus obtida pelo telescópio espacial Spitzer.	20
2.1	Representação da posição da fenda utilizada para obtenção dos dados sobre 30 Doradus.	22
2.2	Imagem de um <i>flat-field</i>	23
2.3	Espectro unidimensional de 30 Doradus não calibrado.	25
2.4	Espectro unidimensional de 30 Doradus calibrado em comprimento de onda e em fluxo.	26
3.1	Perfis espaciais de 30 Doradus.	30

Lista de Siglas e Símbolos

- α , coordenada de ascensão reta do sistema equatorial;
- **CCD**, *Charge Coupled Device* – Dispositivo de Carga Acoplada;
- δ , coordenada de declinação do sistema equatorial;
- **erg**, unidade de energia do sistema CGS, 1 erg equivale a 1.0×10^7 J;
- **ESO**, *European Southern Observatory* – Observatório Europeu do Sul;
- **eV**, elétron-volt, 1 eV equivale a 1.60×10^{-19} J;
- **H β** , segunda linha espectral da série de Balmer para o átomo de hidrogênio;
- **H γ** , terceira linha espectral da série de Balmer para o átomo de hidrogênio;
- **IRAF**, *Image Reduction and Analysis Facility*;
- **LMC**, *Large Magellanic Cloud* – Grande Nuvem de Magalhães;
- **M $_{\odot}$** , massa solar, 1 M $_{\odot}$ equivale a 1.99×10^{30} kg;
- **N $_e$** , densidade eletrônica (cm $^{-3}$);
- **PA**, *Position Angle* – ângulo de posição da fenda, definido como o ângulo do eixo maior da abertura com a direção norte, com sentido crescente de norte para leste;
- **pc**, parsec, 1 pc corresponde a 3.26 anos-luz ou 3.0856×10^{13} km;
- **pxl**, píxel;
- **T $_e$** , temperatura eletrônica (K).

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Regiões HII	14
1.1.1	Processos Físicos em Regiões HII	15
1.2	A Equação de Equilíbrio Estatístico	16
1.2.1	Determinação da Temperatura Eletrônica	16
1.3	O Problema de Discrepância de Abundância	18
1.3.1	As Flutuações Espaciais de Temperatura Eletrônica	18
1.4	Sobre 30 Doradus	19
1.5	Objetivos Propostos	19
2	Obtenção e Redução de Dados	21
2.1	Obtenção dos Dados	21
2.2	Redução e Calibração de Dados	21
2.2.1	Subtração de <i>Bias</i>	23
2.2.2	Divisão por <i>Flat-field</i>	23
2.2.3	Remoção de Raios Cósmicos	24
2.2.4	Extração dos Espectros Unidimensionais	24
2.2.5	Calibração em Comprimento de Onda	24
2.2.6	Calibração em Fluxo	24
3	Análise dos Dados	27
3.1	Combinação dos Espectros e Medidas das Linhas	27
3.2	Correção para Extinção Interestelar	27
3.3	Análise e Propagação de Erros	28
3.4	Cálculo da Temperatura Eletrônica	29
3.5	Estimativa das Flutuações de Temperatura	29

SUMÁRIO	13
4 Conclusões	32
A Tabelas de Dados	34

Capítulo 1

Introdução

1.1 Regiões HII

As regiões HII¹, juntamente com as nebulosas planetárias e os remanescentes de supernova, compõem um grupo denominado *nebulosas ionizadas*. Caracterizam-se como massas de gás, em geral de complexa geometria, formadas basicamente de hidrogênio ionizado, que ocorrem em torno de uma ou mais estrelas do tipo O ou B responsáveis pela emissão de fótons ultravioletas ionizantes. São formadas a partir de nuvens gigantes e frias de hidrogênio molecular que através de ondas de choque de supernovas, ou pelo processo de colisão com outras nuvens, tendem a colapsar e se fragmentar dando origem a formação de estrelas que, posteriormente, irão ionizar o gás em seu entorno. Por essas estrelas serem relativamente jovens, as regiões HII são associadas a "berçários" estelares.

Estas regiões podem ser detectadas desde em raios X até em comprimentos de onda de rádio. Na região óptica do espectro, apresentam fortes linhas de emissão superpostas a um tênue contínuo. Algumas linhas são características dos íons dos elementos O, N e S, bem como dos íons de H e He.

Em relação às propriedades físicas, podem ser classificadas em *regiões HII clássicas* aquelas que possuem uma extensão em torno de 10 pc e com uma densidade da ordem de 100 cm^{-3} , enquanto objetos da ordem ou maiores que 100 pc, com densidade inferior a 10 cm^{-3} , são denominadas *regiões HII gigantes*; e *regiões HII compactas* possuem dimensões inferiores a 1 pc e chegam a possuir densidades de até 10^6 cm^{-3} . De maneira geral a temperatura eletrônica média dessas nebulosas é de 10^4 K . Estima-se que o tempo de vida médio de uma região HII seja da ordem de 10 milhões de anos e que sua massa varie de 10^3 a $10^5 M_{\odot}$.

¹Em espectroscopia o símbolo HII refere-se ao íon H^+ .

Em galáxias irregulares estão distribuídas aleatoriamente, não ocorrem em galáxias elípticas e, em galáxias espirais, estão predominantemente localizadas nos braços destas, assim a análise de suas velocidades permite o cálculo da curva de rotação da galáxia. O estudo de regiões HII é particularmente importante na compreensão da evolução química das galáxias.

1.1.1 Processos Físicos em Regiões HII

Os processos físicos mais importantes em regiões HII são basicamente a *fotoionização*, a *recombinação*, a *excitação colisional*, a *desexcitação radiativa* e as *colisões elásticas entre os elétrons*.

A fotoionização é a absorção de um fóton por um átomo resultando na ejeção de um elétron com energia cinética igual a diferença entre a energia do fóton absorvido e o potencial de ionização do átomo, isto é, a energia mínima necessária para que o elétron se desligue do átomo. No caso do hidrogênio, o potencial de ionização vale 13.6 eV, que corresponde a fótons com comprimento de onda na faixa do ultravioleta.

A recombinação é o processo de captura de um elétron livre por um íon. Após a captura desse elétron, na maior parte das vezes, o átomo não se encontra no nível fundamental; então sofre sucessivos decaimentos emitindo fótons de frequências específicas. As linhas assim produzidas são chamadas de *linhas de recombinação*. As linhas do átomo de H, representadas pelas séries de Lyman, Balmer, Paschen, entre outras, são produzidas por esse mecanismo.

A excitação colisional de átomos e de íons se dá pela colisão destes com os elétrons livres. A energia cinética desses elétrons é suficiente apenas para excitar os átomos.

A desexcitação radiativa é o fenômeno de emissão de radiação devido a transição de um átomo (ou íon) em um certo nível de energia para outro de menor energia. Caso um átomo alcance um nível metaestável após ser excitado colisionalmente, ele emitirá (em um intervalo de tempo suficientemente grande) uma radiação característica ao voltar ao estado fundamental. Em condições terrestres, este tipo de processo possui uma eficiência muito baixa devido à alta densidade do meio (os melhores vácuos obtidos em laboratório correspondem a uma densidade da ordem de 10^9 partículas/cm³), que faz com que os átomos em níveis metaestáveis sejam novamente excitados colisionalmente antes de decaírem. No entanto, em ambientes de baixa densidade, como no caso das regiões HII, este fenômeno é significativo. As linhas de emissão assim obtidas são denominadas *linhas proibidas* ou *linhas de excitação colisional*.

Há ainda as freqüentes colisões elásticas entre os elétrons, o que faz com que estes

assumam uma distribuição maxwelliana de velocidades a qual, apesar da nebulosa não estar em equilíbrio termodinâmico, é associada uma temperatura eletrônica T_e .

1.2 A Equação de Equilíbrio Estatístico

Mesmo fora do equilíbrio termodinâmico, os processos do meio interestelar podem ser considerados estacionários, ou seja, para um certo elemento a população do nível de energia j , n_j , é constante no tempo. Com isso, de acordo com Maciel (2002), é possível expressar essa condição em termos da probabilidade, por unidade de tempo, de que uma partícula no nível j sofra uma transição para o nível k causada pelo processo y $(R_{jk})_y$ como

$$\frac{dn_j}{dt} = -n_j \sum_y \sum_k (R_{jk})_y + \sum_y \sum_k n_k (R_{kj})_y = 0, \quad (1.1)$$

que é a chamada *equação de equilíbrio estatístico*.

Assim, considerando apenas processos de excitação e desexcitação colisional com taxas $(R_{jk})_c$ e $(R_{kj})_c$, respectivamente, transições espontâneas, com coeficientes A_{jk} e transições induzidas com taxas B_{jk} , a equação de equilíbrio estatístico torna-se

$$n_j \left[\sum_k (R_{jk})_c + \sum_k B_{jk} U_\nu + \sum_{k < j} A_{jk} \right] = \sum_k n_k (R_{kj})_c + \sum_k n_k B_{kj} U_\nu + \sum_{k > j} n_k A_{kj}, \quad (1.2)$$

onde U_ν é função densidade de energia de uma radiação de frequência ν escrita como

$$U_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (1.3)$$

No caso de processos colisionais envolvendo elétrons, é comum escrever os coeficientes $(R_{jk})_c$ em termos da *taxa de excitação colisional* γ_{jk} , dada por

$$\gamma_{jk} \equiv \frac{(R_{jk})_c}{N_e}, \quad (1.4)$$

assim, a expressão 1.2 fica

$$n_j \left[\sum_k (N_e \gamma_{jk} + B_{jk} U_\nu) + \sum_{k < j} A_{jk} \right] = \sum_k n_k (N_e \gamma_{kj} + n_k B_{kj} U_\nu) + \sum_{k > j} n_k A_{kj}. \quad (1.5)$$

1.2.1 Determinação da Temperatura Eletrônica

A temperatura, bem como a densidade eletrônica, pode ser relacionada com as intensidades de linhas de emissão de um certo elemento através da equação de equilíbrio estatístico para o meio interestelar, conhecendo-se os parâmetros deste.

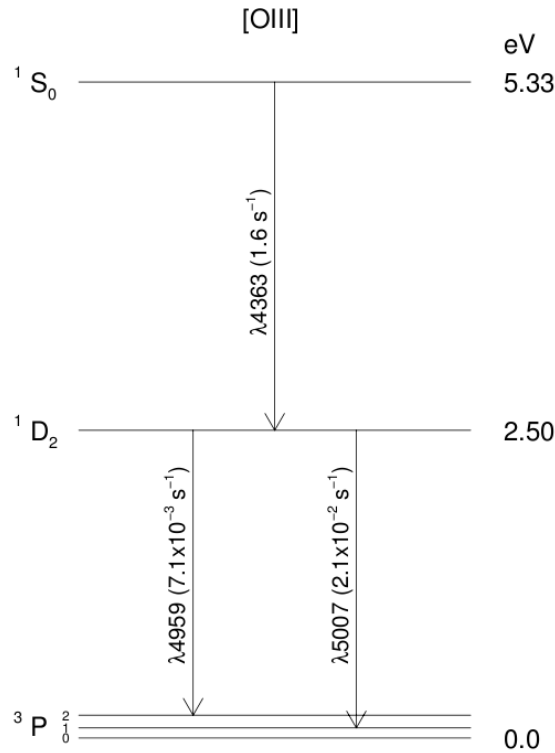


Figura 1.1: Diagrama dos níveis de energia do OIII. O zero de energia está deslocado para uma melhor visualização. O valor entre parênteses representa a probabilidade de transição por unidade de tempo.

Na faixa óptica do espectro, um sensor de temperatura eletrônica, comumente utilizado, baseia-se na razão das intensidades de linhas proibidas do íon OIII (um esquema dos níveis de energia desse íon é apresentado na figura 1.1)

$$R[\text{OIII}] \equiv \frac{I(\lambda 4959) + I(\lambda 5007)}{I(\lambda 4363)}, \quad (1.6)$$

o qual, seguindo Maciel (2002), ao se resolver a equação de equilíbrio estatístico, relaciona-se com a temperatura eletrônica por

$$R[\text{OIII}] = \frac{7.73 \exp(3.29 \times 10^4 / T_e)}{1 + 4.5 \times 10^{-4} (N_e / T_e^{1/2})}, \quad (1.7)$$

com a temperatura e a densidade eletrônicas expressas em unidades de K e cm^{-3} , respectivamente.

Para densidades eletrônicas abaixo de 10^5 cm^{-3} e temperaturas da ordem de 10^4 K , a relação 1.7 pode ser aproximada por

$$R[\text{OIII}] \simeq 7.73 \exp(3.29 \times 10^4 / T_e), \quad (1.8)$$

ou seja, o sensor $R[\text{OIII}]$ é independente da densidade eletrônica.

1.3 O Problema de Discrepância de Abundância

O recente desenvolvimento do instrumental astronômico permitiu a observação, com alta precisão, das fracas linhas de recombinação de elementos pesados, obtendo-se assim uma nova forma de estudar as propriedades físicas do meio interestelar, em especial sua abundância química, até então estimada apenas através de linhas proibidas.

No entanto, as abundâncias de elementos pesados, obtidas via linhas de recombinação são significativamente maiores do que as obtidas via linhas de excitação colisional. Este fato constitui o principal problema em aberto envolvendo nebulosas fotoionizadas, o chamado *problema de discrepância de abundância*.

1.3.1 As Flutuações Espaciais de Temperatura Eletrônica

Visto que as abundâncias são obtidas através de linhas de emissão, e estas, por sua vez, possuem uma íntima relação com a temperatura e densidade eletrônicas, medidas precisas desses parâmetros são imprescindíveis para uma determinação confiável da composição química de nebulosas planetárias ou regiões III. Usualmente essa estimativa é feita utilizando-se valores constantes para a temperatura e densidade eletrônicas ao longo de toda nebulosa.

Uma explicação para discrepância de abundância foi proposta por Peimbert (1967) que sugeriu a hipótese de flutuações espaciais de temperatura eletrônica na nebulosa e propôs o parâmetro t^2 que representava a magnitude dessas flutuações de temperatura definido como

$$t^2 = \frac{\int (T_e - T_0)^2 N_i N_e dV}{T_0^2 \int N_i N_e dV}, \quad (1.9)$$

onde T_0 é a média ponderada da temperatura eletrônica T_e , definida por

$$T_0 = \frac{\int T_e N_i N_e dV}{\int N_i N_e dV}, \quad (1.10)$$

sendo N_e a densidade eletrônica, N_i a densidade do íon usado para medir a temperatura e a integração realizada sobre todo o volume V da nebulosa.

As magnitudes de flutuações de temperatura necessárias para explicar a discrepância de abundância são da ordem de $t^2 \sim 0.02 - 0.10$, valores estes muito mais altos do que os observados e os previstos pelos modelos de fotoionização.

No entanto, a expressão 1.9 não é viável experimentalmente, uma vez que exige o conhecimento da distribuição espacial de temperatura e densidade eletrônicas em toda nebulosa. Nesse sentido, Liu (1998) propôs o uso do parâmetro t_s^2 , estimador direto de

t^2 , dado por

$$t_s^2(\text{obs}) \equiv \frac{\sum_{i=1}^N (T_e^i - T_0)^2 F_i(\text{H}\beta)}{T_0^2 \sum_{i=1}^N F_i(\text{H}\beta)}, \quad (1.11)$$

com T_e^i e $F_i(\text{H}\beta)$ sendo a temperatura eletrônica e o fluxo de H β medidos no i -ésimo ponto, respectivamente, N o número total de pontos e T_0 a média ponderada pelo fluxo de H β da temperatura eletrônica

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^N T_e^i F_i(\text{H}\beta)}{\sum_{i=1}^N F_i(\text{H}\beta)}. \quad (1.12)$$

Para os sensores baseados na descontinuidade de Balmer e da razão [OIII]($\lambda 4959 + \lambda 5007$)/ $\lambda 4363$, Copetti (2006) mostrou que $t_s^2/t^2 \approx 25\%$ a 30% .

1.4 Sobre 30 Doradus

A nebulosa 30 Doradus, representada na figura 1.2, também conhecida por NGC 2070, DEM 273, N 157 e Nebulosa da Tarântula, é a maior região HII presente na Grande Nuvem de Magalhães, uma das galáxias vizinhas da Via-Láctea. 30 Doradus está situada nas coordenadas $\alpha(2000) = 05^{\text{h}}38^{\text{m}}38^{\text{s}}$ e $\delta(2000) = -69^{\circ}05'42''$ a uma distância heliocêntrica de aproximadamente 52.5 kpc, com um tamanho angular de $15'$ e linear de 225 pc, conforme Walborn (1991). Este objeto possui uma morfologia complexa, caracterizada por imensos arcos brilhantes, cujo centro é ocupado pelo aglomerado estelar R136, principal responsável pela ionização do gás. A densidade eletrônica varia significativamente ao longo da nebulosa, assumindo valores próximos a zero em regiões mais difusas e chegando a valores de quase 1000 cm^{-3} nas áreas de maior brilho superficial.

1.5 Objetivos Propostos

A estimativa precisa de parâmetros como a temperatura eletrônica é fundamental para o cálculo da composição química de nebulosas ionizadas. Assim, pelo presente trabalho, propõe-se calcular a temperatura eletrônica do volume observado da região HII 30 Doradus, baseado em espectros de fenda longa de alto sinal/ruído, obtidos no ESO, Chile, através da razão [OIII]($\lambda 4959 + \lambda 5007$)/ $\lambda 4363$. Da análise desses dados, é feita uma estimativa da amplitude das flutuações de temperatura eletrônica, representadas pelo parâmetro t_s^2 , interpretando se a partir desse valor é possível explicar o problema de discrepância de abundância.

Até o momento, no hemisfério sul, são apenas dois os estudos dessa natureza sobre regiões HII, Krabbe & Copetti (2005) sobre 30 Doradus e Oliveira *et al.* (2008) sobre

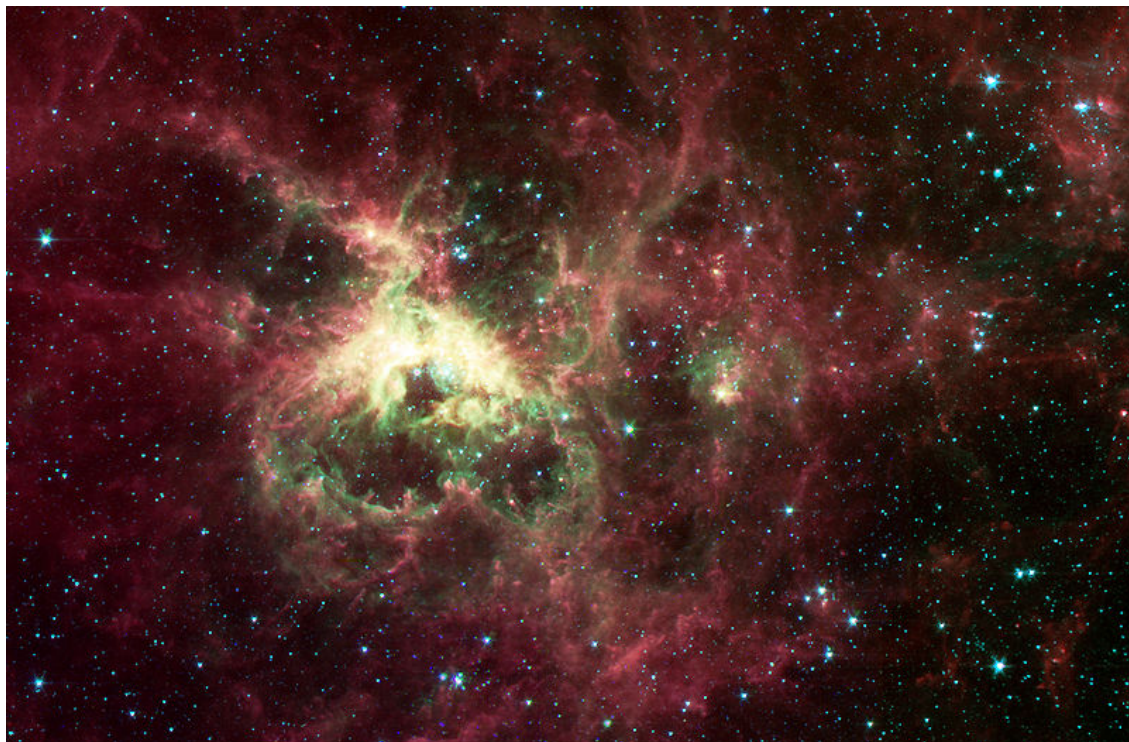


Figura 1.2: Imagem de 30 Doradus obtida pelo telescópio espacial Spitzer. Disponível em <<http://www.30doradus.org>>. Acessada em 17/12/2009.

NGC 346. Apesar de ser um trabalho similar ao realizado por Krabbe & Copetti (2005), este tem como principal diferencial a ausência da linha do céu (HgI) λ 4358 nos espectros, o que dificulta a medida da linha [OIII] λ 4363, além de uma maior razão sinal-ruído, permitindo assim uma melhor resolução espacial.

Capítulo 2

Obtenção e Redução de Dados

2.1 Obtenção dos Dados

As observações da nebulosa 30 Doradus foram realizadas nas noites de 4 e 5 de janeiro de 2002 utilizando um CCD Loral de 2688×512 píxeis e um espectrógrafo Boller & Chivens acoplado ao telescópio de 1.52 m do ESO, La Silla, Chile. Foi utilizada uma rede de 2400 ranhuras mm^{-1} e uma fenda de abertura correspondente a $2'' \times 250''$ no plano do céu. A escala espacial foi de $0.82'' \text{ pxl}^{-1}$. Os espectros obtidos estão na faixa de 3800 a 5100 Å e têm uma dispersão de 0.5 Å pxl^{-1} . As coordenadas equatoriais da estrela utilizada como referência são $\alpha(2000) = 05^{\text{h}}38^{\text{m}}41.63^{\text{s}}$ e $\delta(2000) = -69^{\circ}05'14.0''$. Os espectros foram obtidos com a fenda alinhada no sentido leste-oeste ($\text{PA} = 90^{\circ}$). A figura 2.1 mostra a nebulosa 30 Doradus e a posição na qual foram feitas as observações, representada pela linha em vermelho.

Na primeira noite foram obtidos três espectros bidimensionais, expostos durante 1200 s cada. Na segunda, foram feitas quatro exposições de 300 s e outras quatro de 600 s cada. Também foram feitas exposições de *flat-field*, *bias*, observação das estrelas padrão LTT 2515, LTT 3218 e HR 3454 para a calibração em fluxo e de lâmpadas de comparação de He-Ar para a calibração em comprimento de onda.

2.2 Redução e Calibração de Dados

A redução de dados consiste em uma série de etapas que visam eliminar as imperfeições nas imagens causadas pelo aparato instrumental e outros fatores, além de calibrá-las em unidades físicas padrão. Para isso, pode-se utilizar o *software* de processamento de dados IRAF. Esses procedimentos são descritos de forma sucinta no que se segue. Para um maior detalhamento, recomenda-se os manuais de Barnes (1993), Massey (1997) e Massey *et al.* (1992).

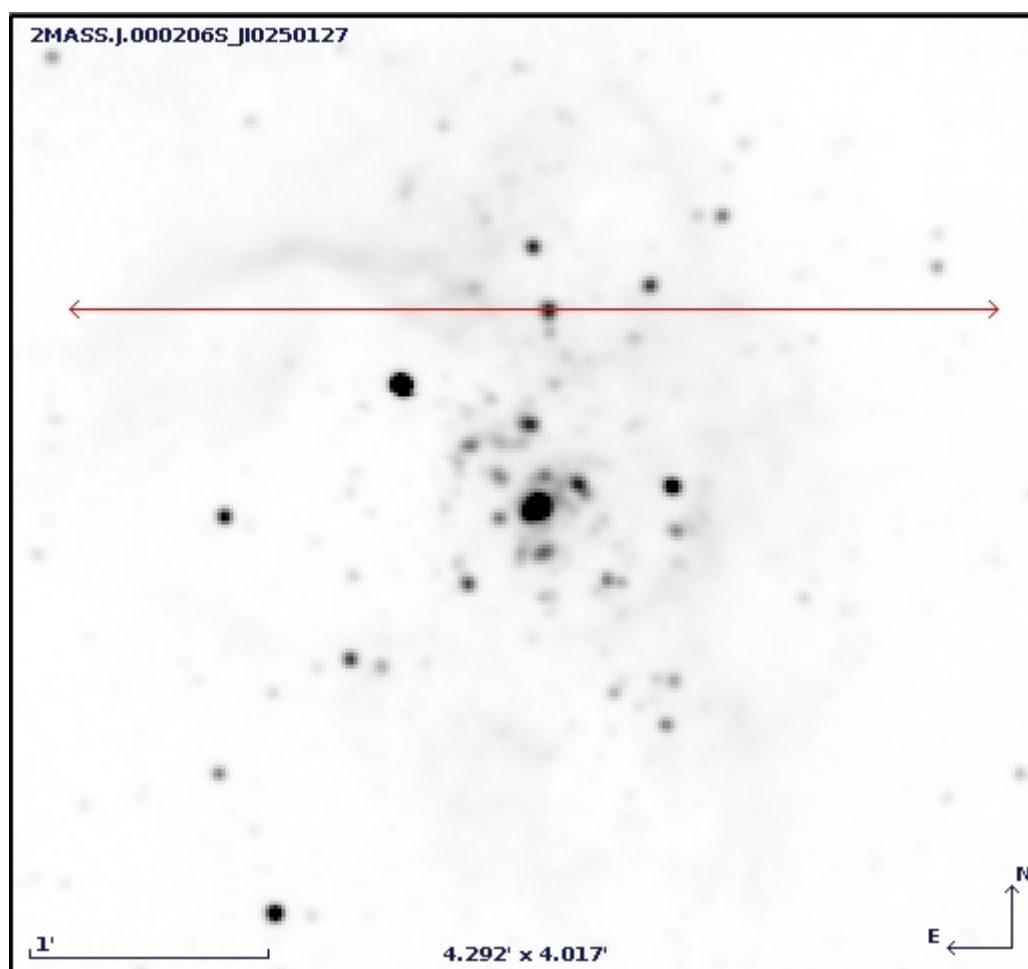


Figura 2.1: Representação da posição da fenda utilizada para obtenção dos dados sobre 30 Doradus. Imagem obtida do *The Two Micron All Sky Survey* (2MASS) e observada pelo programa do *Infrared Processing and Analysis Center* (IPAC) utilizando um filtro J. Localizada com o software *Aladin* disponível em <http://aladin.u-strasbg.fr>. Acessada em 19/12/2009.

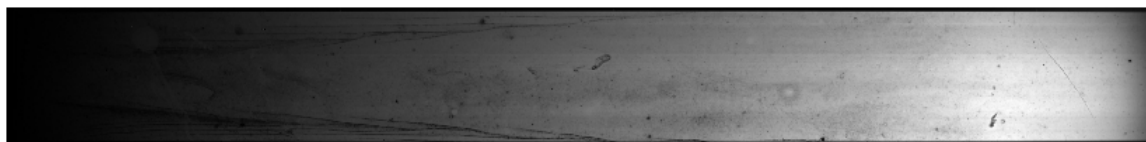


Figura 2.2: Imagem de um *flat-field* mostrando as variações de sensibilidade do detector.

2.2.1 Subtração de *Bias*

Inicialmente determinou-se a região útil dos espectros, isto é, a região que continha os dados relevantes, através da rotina **implot**. Em um segundo momento definiu-se os parâmetros do instrumento utilizado através da tarefa **setinstrument**, onde o pacote utilizado foi **specphot** já que os dados em questão são de origem espectroscópica.

O *bias* é uma imagem formada pelas contagens que os píxeis do CCD registram quando não há incidência de luz sobre eles. Pode ser obtida através de uma exposição muito rápida do CCD com o obturador do detector fechado, medindo dessa forma o nível zero do detector. Como várias imagens *bias* foram obtidas, determinou-se um *bias* médio através da tarefa **zerocombine**. Em seguida, com a tarefa **ccdproc**, retirou-se as regiões que não apresentavam informações úteis e subtraiu-se o *bias* médio das imagens. Ambas as tarefas mencionadas nesse parágrafo localizam-se no pacote **imred.ccdred**.

2.2.2 Divisão por *Flat-field*

Os píxeis do CCD apresentam variações locais de sensibilidade, devido, entre outros fatores, às imperfeições de fabricação e a existência de grãos de poeira ou sujeira no sistema. Assim, píxeis submetidos à mesma quantidade de radiação não registram a mesma contagem. Este fato pode ser corrigido, ou pelo menos minimizado, através das imagens de *flat-field* (ver figura 2.2), obtidas com a incidência de uma luz homogênea no CCD.

Uma média de todas as imagens de *flat-field* foi feita através da tarefa **flatcombine**, do pacote **ccdred**. Em seguida o *flat-field* médio foi normalizado com o auxílio da tarefa **response** do pacote **twodspec.longslit**. Então, dividiu-se a imagens do objeto e das estrelas padrão pelo *flat-field* normalizado com a rotina **ccdproc**.

2.2.3 Remoção de Raios Cósmicos

Os raios cósmicos são partículas de alta energia que vêm do espaço e estão constantemente atravessando a Terra. Ao colidirem com o CCD, eles se manifestam nas imagens como contagens muito intensas e localizadas, prejudicando a qualidade dos dados. Estes foram removidos iterativamente com a tarefa **imedit**.

2.2.4 Extração dos Espectros Unidimensionais

Após a conclusão dos passos anteriores, utilizando a tarefa **apall**, do pacote **twods-pec.apextract**, tendo em vista a escala espacial do CCD e o *seeing* local, foram extraídos de cada espectro bidimensional do objeto, 140 espectros unidimensionais, correspondendo a aberturas de $2'' \times 1.64''$ cada. Estes foram devidamente corrigidos, através do ajuste do traço, para qualquer possível desalinhamento ao longo do eixo de dispersão. A subtração das linhas do céu não foi necessária.

2.2.5 Calibração em Comprimento de Onda

Para a calibração em comprimento de onda extraiu-se, com a rotina **apall**, espectros unidimensionais das lâmpadas de comparação de He-Ar tomando como referência os padrões utilizados na extração dos espectros do objeto. Em seguida utilizou-se a tarefa **identify**, do pacote **imred.ctioslit**, para identificar as linhas no espectro de uma lâmpada e ajustar uma função de dispersão. A fim de calibrar os demais espectros das lâmpadas de comparação de forma idêntica, fez-se uso da rotina **reidentify**, do mesmo pacote, que tem como referência os parâmetros do espectro da lâmpada calibrado inicialmente.

Então, adicionou-se no cabeçalho dos espectros dos objetos os parâmetros REFSPEC1 e REFSPEC2, correspondentes aos espectros das lâmpadas de comparação obtidos, respectivamente, antes e depois aos do objeto. Finalmente, com a tarefa **dispcor**, também do pacote **imred.ctioslit**, aplicou-se as soluções de dispersão aos espectros dos objetos, concluindo assim a calibração em comprimento de onda.

2.2.6 Calibração em Fluxo

Para a calibração em unidades de fluxo, os espectros das estrelas padrão já devem estar calibrados em comprimento de onda – cujo procedimento é análogo ao descrito para os espectros do objeto.

O primeiro passo foi a correção da massa de ar, que é uma medida da distância

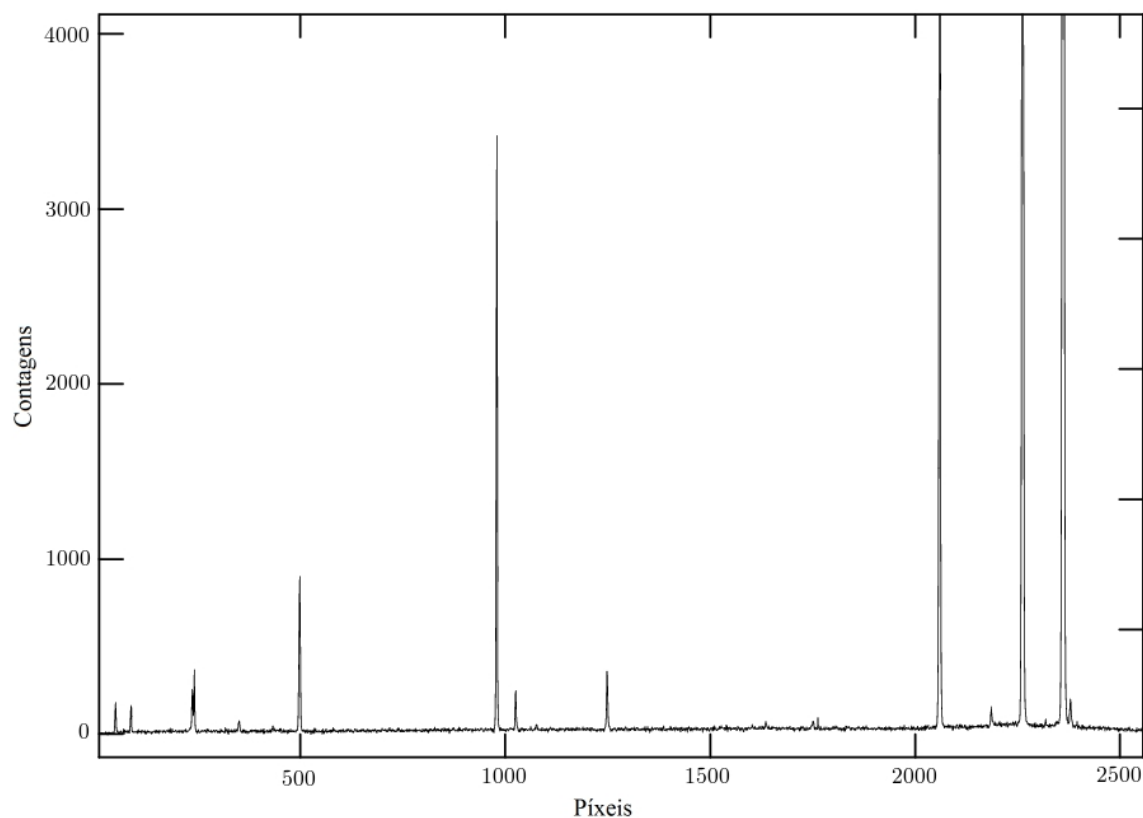


Figura 2.3: Espectro unidimensional, ampliado, de 30 Doradus não calibrado.

percorrida pela radiação, na atmosfera, até atingir o detector; para isso foi acrescentado no cabeçalho dos espectros do objeto e das estrelas padrão o campo AIRMASS. O valor desse campo foi obtido calculando-se a secante da distância zenital, que era fornecida no cabeçalho das imagens. Em seguida estabeleceu-se os subdiretórios do pacote **ctioslit** relativos às estrelas padrão. Então foi executada a tarefa **standard**, do referido pacote, que gera um arquivo contendo os fluxos absolutos e as respectivas contagens ao longo do eixo de dispersão de cada estrela padrão. Desse arquivo de saída, ainda foi ajustada uma função sensibilidade pela tarefa **sensfunc**. Por fim, com a rotina **calibrate** aplicou-se a correção atmosférica e a função sensibilidade aos espectros unidimensionais do objeto, terminando a etapa de calibração em fluxo. As figuras 2.3 e 2.4 ilustram os espectros unidimensionais antes e depois do procedimento de calibração, respectivamente.

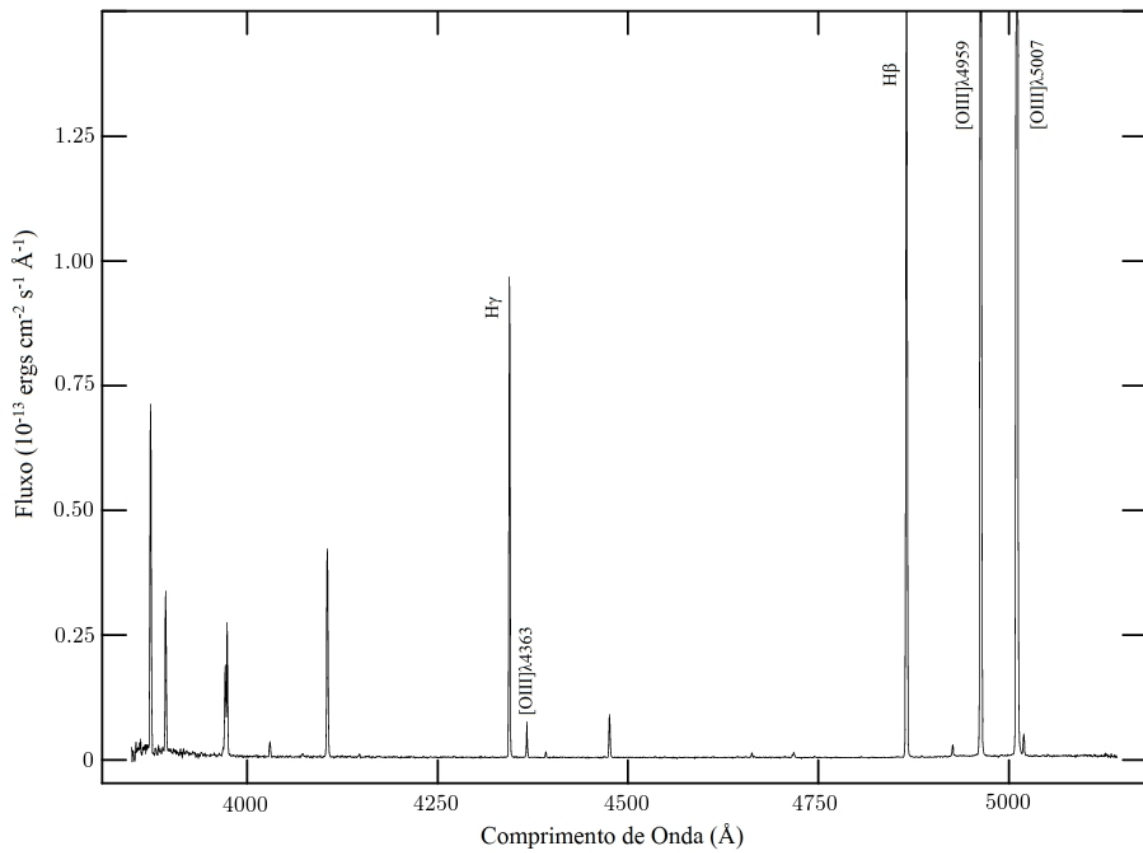


Figura 2.4: Espectro unidimensional de 30 Doradus, ampliado, calibrado em comprimento de onda e em fluxo.

Capítulo 3

Análise dos Dados

3.1 Combinação dos Espectros e Medidas das Linhas

Utilizando o IRAF, os espectros unidimensionais, devidamente calibrados, foram combinados ($4 \times 300 + 4 \times 600 + 3 \times 1200$ s), tendo como pesos estatísticos seus tempos de exposição, através da tarefa `scombine` do pacote `noao.onedspec`.

Em posse desses dados, mediu-se os fluxos de $H\beta$, $H\gamma$ e das linhas do [OIII] $\lambda 4363$, $\lambda 4959$ e $\lambda 5007$. Apesar da possibilidade da execução de tais medidas de forma automática através da rotina `fitprof`, também do pacote `onedspec`, estas foram feitas inicialmente de maneira iterativa, a fim de se obter maior familiarização com a técnica da medida da intensidade das linhas, feita ajustando-se uma curva gaussiana às linhas de emissão com base no espectro contínuo.

3.2 Correção para Extinção Interestelar

Da mesma forma como a radiação é absorvida e espalhada pela atmosfera terrestre, ela também o é pelo meio interestelar; o efeito é mais acentuado para radiações de maiores frequências. A correção desse fenômeno foi feita adotando a intensidade da linha $H\beta$ como referência. As radiações com comprimento de onda menores que esta terão um acréscimo em sua intensidade observada relativa a $H\beta$, enquanto as com maiores comprimentos de onda terão um decréscimo.

Assim, a intensidade real emitida em um certo comprimento de onda $I(\lambda)$, normalizada pelo fluxo de $H\beta$, é expressa através da *lei de extinção interestelar* dada por

$$\frac{I(\lambda)}{I(H\beta)} = \frac{F(\lambda)}{F(H\beta)} 10^{C(H\beta)f(\lambda)}, \quad (3.1)$$

em que $F(\lambda)$ é o fluxo observado, $f(\lambda)$ é a dependência da extinção interestelar com o

comprimento de onda e $C(H\beta)$ é o coeficiente de extinção interestelar.

A função $f(\lambda)$, para todas as linhas em questão, foi avaliada pela tarefa **redcorr**, do pacote **analysis.nebular**, para a Grande Nuvem de Magalhães e o cálculo do coeficiente de extinção interestelar foi feito resolvendo-se a expressão 3.1 para $C(H\beta)$ e utilizando-se do fato que $I(H\gamma)/I(H\beta) = 0.469$, assim

$$C(H\beta) = -\frac{1}{f(\gamma)} \log \left[\frac{F(H\gamma)/F(H\beta)}{I(H\gamma)/I(H\beta)} \right]. \quad (3.2)$$

3.3 Análise e Propagação de Erros

Qualquer medida física está sujeita a erros. No caso das linhas de emissão, esses erros são estimados a partir da relação

$$\sigma_{F(\lambda)}^2 = \sigma_L^2 + \sigma_{cont}^2, \quad (3.3)$$

sendo $\sigma_{F(\lambda)}$ o erro total do fluxo no comprimento de onda λ , σ_L o erro do fluxo da linha e σ_{cont} o erro do contínuo.

O erro no fluxo da linha é atribuído a um erro poissônico expresso na forma

$$\sigma_L = \frac{F(\lambda)}{\sqrt{C(\lambda)}}, \quad (3.4)$$

onde $F(\lambda)$ representa o fluxo e $C(\lambda)$ o número total de fótons, detectados pelo CCD, da linha em questão.

O erro do contínuo é escrito como

$$\sigma_{cont} = \sqrt{W} \Delta \sigma_C, \quad (3.5)$$

em que W é a largura da base medida em píxeis, Δ é a escala de dispersão ($\text{\AA} \text{ pxl}^{-1}$) e σ_C é o desvio quadrático médio (*rms*) do fluxo do contínuo próximo à linha.

Assim

$$\sigma_{F(\lambda)} = \sqrt{W (\Delta \sigma_C)^2 + \frac{F(\lambda)^2}{C(\lambda)}}. \quad (3.6)$$

Os erros das variáveis u e v , σ_u e σ_v , respectivamente, são propagados para uma função $f(u, v)$ na forma

$$\sigma_f^2 \simeq \sigma_u^2 \left(\frac{\partial f}{\partial u} \right)^2 + \sigma_v^2 \left(\frac{\partial f}{\partial v} \right)^2 + 2\sigma_{uv}^2 \left(\frac{\partial f}{\partial u} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial v} \right), \quad (3.7)$$

onde σ_f é o erro em f e σ_{uv}^2 representa o termo de covariância entre u e v . Como os fluxos das linhas de emissão são independentes entre si, o termo de covariância é nulo.

A partir disso, foram calculados os erros das linhas corrigidas para extinção interestelar, $\sigma_{I(\lambda)}$

$$\sigma_{I(\lambda)} = \frac{F(\lambda)}{F(\text{H}\beta)} 10^{C(\text{H}\beta)f(\lambda)} \sqrt{\left[\frac{\sigma_{F(\lambda)}}{F(\lambda)}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_{F(\text{H}\beta)}}{F(\text{H}\beta)}\right]^2 + [\sigma_{C(\text{H}\beta)}f(\lambda) \ln 10]^2}, \quad (3.8)$$

do coeficiente de extinção interestelar, $\sigma_{C(\text{H}\beta)}$

$$\sigma_{C(\text{H}\beta)} = \frac{1}{f(\gamma) \ln 10} \sqrt{\left[\frac{\sigma_{F(\text{H}\gamma)}}{F(\text{H}\gamma)}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_{F(\text{H}\beta)}}{F(\text{H}\beta)}\right]^2} \quad (3.9)$$

e da razão de linhas $[\text{OIII}](\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363$, $\sigma_{\text{R}[\text{OIII}]}$

$$\sigma_{\text{R}[\text{OIII}]} = \frac{I(\lambda 4959) + I(\lambda 5007)}{I(\lambda 4363)} \sqrt{\frac{\sigma_{I(\lambda 4959)}^2 + \sigma_{I(\lambda 5007)}^2}{[I(\lambda 4959) + I(\lambda 5007)]^2} + \left[\frac{\sigma_{I(\lambda 4363)}}{I(\lambda 4363)}\right]^2}. \quad (3.10)$$

3.4 Cálculo da Temperatura Eletrônica

A temperatura eletrônica foi calculada pelo sensor $\text{R}[\text{OIII}](\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363$ através da tarefa **temden** do pacote **analysis.nebular** adotando uma densidade eletrônica de 100 cm^{-3} . A temperatura eletrônica média encontrada a partir da relação 1.12 foi de $9880 \pm 19 \text{ K}$, onde a incerteza da medida foi avaliada pelo erro quadrático médio ponderado por $F(\text{H}\beta)$

$$\sigma_{T_0} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_e^i - T_0)^2 F_i(\text{H}\beta)}{(N-1) \sum_{i=1}^N F_i(\text{H}\beta)}}, \quad (3.11)$$

com uma dispersão de 225 K estimada através do desvio padrão $\sigma = \sqrt{N} \sigma_{T_0}$.

Dessa forma foi possível a obtenção dos perfis espaciais de 30 Doradus mostrados na figura 3.1.

3.5 Estimativa das Flutuações de Temperatura

Através da expressão 1.11 foi calculado $t_s^2(\text{obs}) = 0.00054$. No entanto, como parte desse valor deve-se exclusivamente a erros nas medidas, o valor de t_s^2 deve ser corrigido

$$t_s^2(\text{OIII}) = t_s^2(\text{obs}) - t_s^2(\text{err}), \quad (3.12)$$

onde

$$t_s^2(\text{err}) = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta T_e^i / T_e^i)^2 F_i(\text{H}\beta)}{\sum_{i=1}^N F_i(\text{H}\beta)}, \quad (3.13)$$

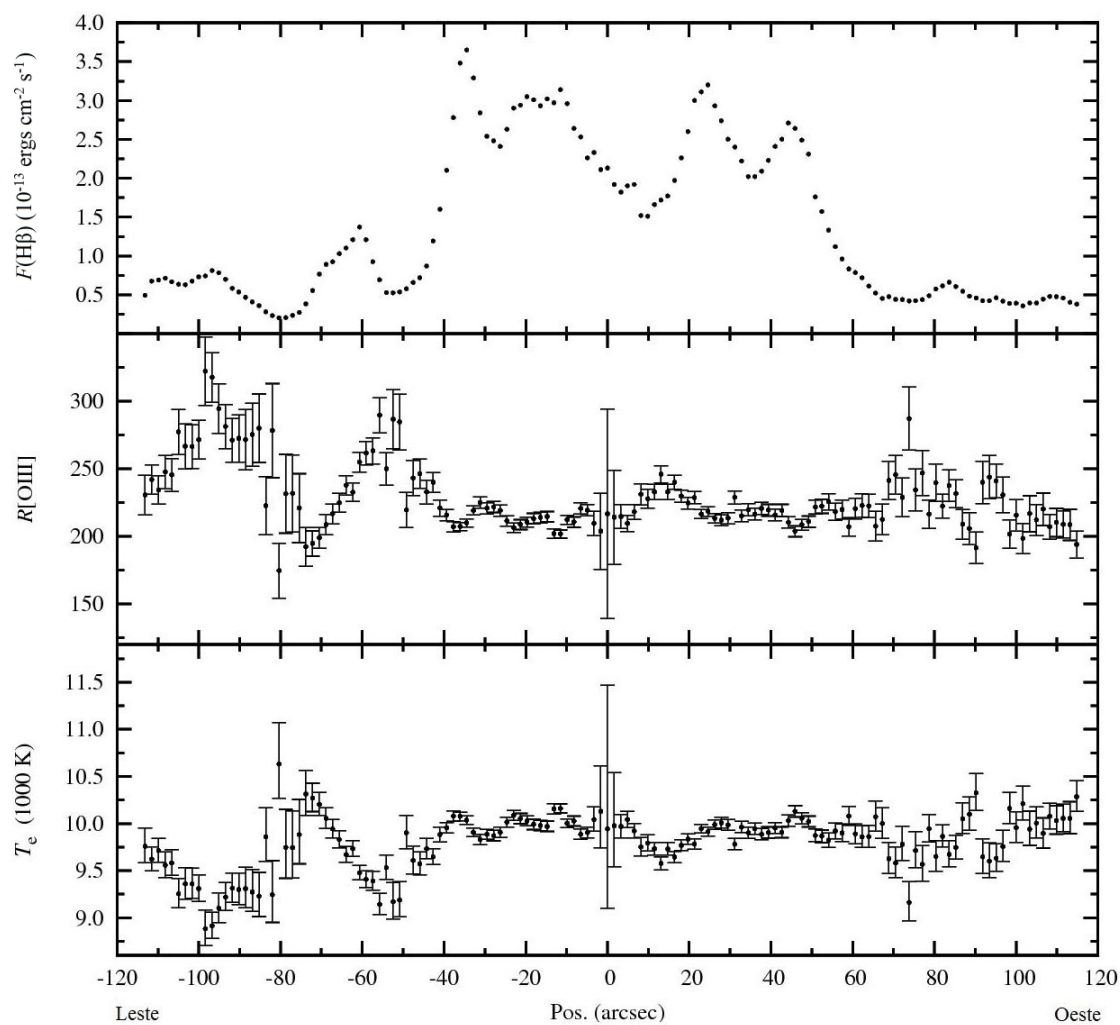


Figura 3.1: Perfis espaciais de 30 Doradus com posição da fenda de $PA = 90^\circ$ – fluxo de $H\beta$ em unidades de $10^{-13} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, razão de linhas $[OIII](\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363$ e temperatura eletrônica em K. A posição zero é associada a estrela de referência. As barras de erro de $F(H\beta)$ foram omitidas uma vez que possuem, praticamente, o mesmo tamanho dos pontos das medidas.

em que ΔT_e^i é a média da incerteza em T_e^i . Assim, encontrou-se $t_s^2(\text{OIII}) = 0.00025$.

O valor obtido de $t_s^2(\text{OIII})$ está de acordo com os modelos de fotoionização e também com o calculado por Krabbe & Copetti (2002), $t_s^2(\text{OIII}) = 0.0003$, para a mesma região¹ da nebulosa, mas é cerca de dez vezes menor do que o valor encontrado por Oliveira *et al.* (2008) para NGC 346, $t_s^2(\text{OIII}) = 0.0021$.

¹PA=90°, centrada na estrela $\alpha(2000) = 05^{\text{h}}38^{\text{m}}41.63^{\text{s}}$ e $\delta(2000) = -69^{\circ}05'14.0''$.

Capítulo 4

Conclusões

A temperatura eletrônica da nebulosa 30 Doradus foi estimada pela análise de dados espectrofotométricos de fenda longa de alta razão sinal ruído, na faixa de 3800 a 5100 Å, obtidos no Observatório Europeu do Sul, Chile, a partir da razão $[OIII](\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363$.

Os principais resultados deste trabalho foram:

1. A detecção de suaves flutuações espaciais de temperatura eletrônica ao longo da região observada;
2. A temperatura eletrônica média, ponderada pelo fluxo de $H\beta$, encontrada foi de 9880 ± 19 K, com uma dispersão de 225 K, correspondente a 2.3% da média;
3. A magnitude das flutuações de temperatura foi estimada por $t_s^2(OIII) = 0.00025$, que apesar de estar de acordo com os modelos de fotoionização e em concordância com trabalho de Krabbe & Copetti (2002), não é suficiente para explicar o problema de discrepância de abundância.

Referências

BARNES, J. **A Beginner's Guide to Using IRAF (IRAF Version 2.10)**. August 1993.

COPETTI, M. V. F. **Astronomy & Astrophysics**, 453, 943, 2006.

KRABBE, A. C. **Flutuação de Temperatura Eletrônica na Região HII de 30 Doradus**. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

KRABBE, A. C.; COPETTI, M. V. F. **Astronomy & Astrophysics**, 387:295-300, 2002.

LIU, X. W. **Monthly Notices Roy. Astron. Soc.**, 295, 699, 1998.

MACIEL, W. J. **Astrofísica do Meio Interestelar**. Universidade de São Paulo, 2002. 360 p.

MASSEY, P., *et al.* **A User's Guide to Reducing Slit Spectra with IRAF**. April 1992. 47 p.

MASSEY, P. **A User's Guide to CCD Reductions with IRAF**. February 1997. 49 p.

OLIVEIRA, V. A.; COPETTI, M. V. F.; KRABBE, A. C. **Astronomy & Astrophysics**, 492:463-468, 2008.

PEIMBERT, M. **Astrophysics Journal**, 150, 825, 1967.

WALBORN, N. R. **The Magellanic Clouds**, IAU Symp. 148 ed. R. Haynes & D. Milne (Dordrecht:Kluwer), 1991.

Apêndice A

Tabelas de Dados

Os valores dos fluxos das linhas corrigidos para extinção interestelar, normalizados pelo fluxo de $H\beta$ e seus respectivos erros são apresentados na tabela A.1 juntamente com o coeficiente de extinção interestelar. Na tabela A.2 são apresentados, também com suas incertezas, os fluxos absolutos de $H\beta$, a razão $[OIII](\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363$ e a temperatura eletrônica obtida através deste sensor para 30 Doradus, nas 140 aberturas.

Tabela A.1: Coeficiente de extinção interestelar e fluxos relativos a $H\beta$ [$F(H\beta) = 100$] corrigidos para extinção interestelar em 30 Doradus

Abertura	$C(H\beta)$	$F(H\gamma)$	$F(\lambda 4363)$	$F(\lambda 4959)$	$F(\lambda 5007)$
1	0.44±0.03	46.90±0.72	2.36±0.15	144.10±0.97	400.27±2.49
2	0.62±0.03	46.90±0.62	2.45±0.11	153.27±0.88	440.94±2.34
3	0.72±0.03	46.90±0.63	2.69±0.12	160.33±0.90	469.85±2.45
4	0.77±0.03	46.90±0.62	2.60±0.13	162.58±0.89	481.02±2.47
5	0.89±0.03	46.90±0.66	2.65±0.13	164.24±0.94	487.03±2.59
6	0.93±0.03	46.90±0.68	2.35±0.14	163.67±0.96	488.62±2.68
7	0.88±0.03	46.90±0.68	2.39±0.15	160.55±0.95	475.46±2.62
8	0.86±0.03	46.90±0.65	2.31±0.14	155.81±0.89	458.87±2.44
9	0.94±0.03	46.90±0.63	2.27±0.12	155.06±0.85	460.57±2.36
10	0.96±0.03	46.90±0.65	1.91±0.15	153.10±0.84	462.73±2.37
11	0.93±0.03	46.90±0.60	1.91±0.11	150.00±0.79	455.60±2.21
12	0.98±0.03	46.90±0.62	2.08±0.13	148.71±0.80	464.02±2.30
13	1.05±0.03	46.90±0.66	2.25±0.13	149.35±0.85	483.45±2.53
14	1.07±0.03	46.90±0.72	2.37±0.14	152.91±0.95	488.45±2.81
15	1.10±0.03	46.90±0.75	2.34±0.15	156.13±1.01	480.90±2.88
16	1.11±0.04	46.90±0.82	2.32±0.19	156.41±1.08	473.24±3.06
17	1.08±0.04	46.90±0.87	2.24±0.19	153.22±1.14	464.59±3.23
18	1.07±0.04	46.90±0.93	2.21±0.20	155.04±1.24	463.85±3.44
19	1.14±0.05	46.90±1.07	2.91±0.28	162.08±1.44	485.08±4.05
20	1.14±0.05	46.90±1.19	2.32±0.29	163.95±1.62	480.64±4.46
21	1.13±0.06	46.90±1.27	3.54±0.41	159.10±1.68	458.65±4.56
22	1.00±0.06	46.90±1.24	2.62±0.33	157.80±1.67	448.88±4.44
23	0.93±0.05	46.90±1.16	2.61±0.32	153.85±1.53	451.16±4.17
24	0.81±0.05	46.90±1.07	2.69±0.31	149.81±1.39	444.41±3.81
25	0.71±0.04	46.90±0.87	2.98±0.22	147.69±1.15	425.49±3.05
26	0.61±0.03	46.90±0.69	2.97±0.14	151.72±0.97	427.32±2.52
27	0.60±0.03	46.90±0.59	3.08±0.12	159.82±0.85	453.21±2.25
28	0.58±0.02	46.90±0.54	3.08±0.11	166.33±0.82	476.91±2.18
29	0.54±0.02	46.90±0.53	3.01±0.10	166.46±0.80	486.24±2.18
30	0.50±0.02	46.90±0.49	2.88±0.09	163.89±0.75	484.47±2.06
31	0.47±0.02	46.90±0.48	2.70±0.08	163.74±0.73	477.82±1.97
32	0.44±0.02	46.90±0.45	2.71±0.08	162.55±0.69	468.59±1.84
33	0.40±0.02	46.90±0.42	2.47±0.07	161.95±0.64	466.89±1.71
34	0.44±0.02	46.90±0.45	2.43±0.08	162.48±0.68	474.14±1.85
35	0.50±0.02	46.90±0.53	2.44±0.09	162.08±0.79	481.52±2.16
36	0.48±0.03	46.90±0.61	2.24±0.10	172.59±0.96	477.66±2.48
37	0.48±0.03	46.90±0.70	2.54±0.12	179.33±1.14	455.68±2.74
38	0.48±0.03	46.90±0.71	2.11±0.16	177.12±1.13	426.80±2.58
39	0.45±0.03	46.90±0.70	2.08±0.15	176.64±1.12	414.40±2.50
40	0.46±0.03	46.90±0.68	2.69±0.16	176.15±1.08	415.31±2.41
41	0.44±0.03	46.90±0.62	2.46±0.13	176.63±1.01	421.92±2.29
42	0.44±0.03	46.90±0.60	2.49±0.11	178.42±0.97	435.55±2.25
43	0.46±0.02	46.90±0.54	2.68±0.10	178.45±0.88	446.32±2.08
44	0.46±0.02	46.90±0.46	2.67±0.08	177.23±0.75	463.58±1.84

Tabela A.1: Coeficiente de extinção interestelar e fluxos relativos a $H\beta$ [$F(H\beta) = 100$] corrigidos para extinção interestelar em 30 Doradus

Abertura	$C(H\beta)$	$F(H\gamma)$	$F(\lambda 4363)$	$F(\lambda 4959)$	$F(\lambda 5007)$
45	0.51±0.02	46.90±0.40	2.97±0.08	174.91±0.64	481.63±1.64
46	0.49±0.02	46.90±0.35	3.16±0.06	177.82±0.56	503.65±1.49
47	0.42±0.01	46.90±0.30	3.36±0.06	181.84±0.50	514.01±1.32
48	0.42±0.01	46.90±0.27	3.41±0.05	184.31±0.45	521.83±1.19
49	0.45±0.01	46.90±0.26	3.42±0.05	186.24±0.44	532.85±1.19
50	0.56±0.01	46.90±0.28	3.31±0.05	186.50±0.47	539.12±1.27
51	0.64±0.01	46.90±0.30	3.23±0.06	185.90±0.50	541.29±1.38
52	0.71±0.01	46.90±0.32	3.24±0.06	183.54±0.52	532.05±1.43
53	0.73±0.01	46.90±0.33	3.19±0.06	181.89±0.53	524.81±1.43
54	0.69±0.02	46.90±0.33	3.21±0.06	181.46±0.53	521.52±1.45
55	0.61±0.01	46.90±0.32	3.35±0.06	183.08±0.51	525.96±1.39
56	0.55±0.01	46.90±0.30	3.46±0.06	184.24±0.49	529.40±1.33
57	0.55±0.01	46.90±0.30	3.44±0.06	185.50±0.49	532.22±1.33
58	0.57±0.01	46.90±0.29	3.41±0.06	185.40±0.48	532.38±1.31
59	0.59±0.01	46.90±0.29	3.35±0.06	184.20±0.48	530.59±1.31
60	0.60±0.01	46.90±0.30	3.32±0.06	182.84±0.49	528.18±1.32
61	0.60±0.01	46.90±0.29	3.27±0.06	181.53±0.48	520.59±1.28
62	0.54±0.01	46.90±0.29	3.38±0.06	177.94±0.47	505.35±1.26
63	0.51±0.01	46.90±0.28	3.36±0.05	176.17±0.46	501.77±1.22
64	0.53±0.01	46.90±0.29	3.26±0.05	179.27±0.48	512.66±1.28
65	0.52±0.01	46.90±0.31	3.34±0.06	181.95±0.51	521.99±1.38
66	0.47±0.01	46.90±0.32	3.20±0.06	181.48±0.52	524.10±1.41
67	0.38±0.01	46.90±0.33	3.19±0.06	179.20±0.54	519.85±1.47
68	0.34±0.02	46.90±0.38	3.26±0.14	174.70±0.55	509.01±1.52
69	0.40±0.03	46.90±0.76	3.09±0.43	161.65±0.92	468.28±2.56
70	0.30±0.07	46.90±1.57	2.59±0.93	144.28±1.60	415.88±4.41
71	0.28±0.04	46.90±0.85	2.87±0.47	158.34±1.08	455.54±2.94
72	0.29±0.02	46.90±0.40	3.14±0.13	173.83±0.65	499.67±1.75
73	0.23±0.02	46.90±0.36	3.24±0.09	175.44±0.59	503.10±1.57
74	0.24±0.02	46.90±0.36	3.12±0.08	175.63±0.58	503.83±1.56
75	0.31±0.02	46.90±0.41	2.94±0.10	175.80±0.66	504.63±1.77
76	0.33±0.02	46.90±0.41	2.98±0.09	175.23±0.66	503.89±1.77
77	0.27±0.02	46.90±0.38	2.91±0.07	175.21±0.63	502.40±1.67
78	0.26±0.02	46.90±0.37	2.77±0.07	176.12±0.62	505.72±1.65
79	0.31±0.02	46.90±0.37	2.94±0.07	176.05±0.61	507.40±1.63
80	0.36±0.02	46.90±0.35	2.87±0.06	176.88±0.58	511.40±1.56
81	0.42±0.01	46.90±0.33	3.01±0.06	178.55±0.54	512.26±1.46
82	0.45±0.01	46.90±0.31	3.11±0.06	181.90±0.52	517.22±1.38
83	0.44±0.01	46.90±0.29	3.12±0.06	186.07±0.49	526.90±1.30
84	0.39±0.01	46.90±0.28	3.28±0.05	185.80±0.48	524.94±1.27
85	0.36±0.01	46.90±0.28	3.15±0.05	179.42±0.46	509.46±1.22
86	0.41±0.01	46.90±0.29	3.12±0.05	172.08±0.46	493.36±1.24
87	0.45±0.01	46.90±0.30	3.10±0.06	169.83±0.47	488.04±1.27
88	0.44±0.01	46.90±0.32	3.06±0.06	168.95±0.49	485.06±1.32

Tabela A.1: Coeficiente de extinção interestelar e fluxos relativos a $H\beta$ [$F(H\beta) = 100$] corrigidos para extinção interestelar em 30 Doradus

Abertura	$C(H\beta)$	$F(H\gamma)$	$F(\lambda 4363)$	$F(\lambda 4959)$	$F(\lambda 5007)$
89	0.36±0.01	46.90±0.32	2.86±0.06	169.24±0.50	484.64±1.34
90	0.36±0.01	46.90±0.33	3.03±0.06	169.01±0.52	483.80±1.39
91	0.42±0.02	46.90±0.35	2.97±0.06	168.73±0.55	483.76±1.46
92	0.44±0.02	46.90±0.35	3.02±0.06	168.22±0.54	484.62±1.46
93	0.38±0.02	46.90±0.34	2.98±0.06	169.56±0.54	488.68±1.45
94	0.37±0.01	46.90±0.33	3.01±0.06	170.07±0.53	489.68±1.41
95	0.39±0.01	46.90±0.32	3.06±0.06	170.41±0.51	489.58±1.35
96	0.44±0.01	46.90±0.32	3.03±0.06	171.86±0.50	492.97±1.34
97	0.51±0.01	46.90±0.31	3.12±0.06	170.67±0.48	486.04±1.27
98	0.50±0.01	46.90±0.31	3.20±0.06	170.04±0.49	482.21±1.29
99	0.46±0.01	46.90±0.32	3.13±0.06	170.35±0.50	483.24±1.32
100	0.39±0.01	46.90±0.33	3.14±0.06	172.39±0.52	489.14±1.38
101	0.35±0.02	46.90±0.37	3.03±0.07	175.41±0.61	496.83±1.61
102	0.33±0.02	46.90±0.39	3.03±0.07	175.80±0.64	498.47±1.71
103	0.27±0.02	46.90±0.42	2.99±0.08	175.71±0.70	499.72±1.85
104	0.28±0.02	46.90±0.46	3.14±0.09	178.24±0.77	506.17±2.04
105	0.29±0.02	46.90±0.50	3.16±0.10	180.43±0.84	513.50±2.24
106	0.38±0.02	46.90±0.54	3.35±0.11	180.23±0.90	513.06±2.41
107	0.40±0.03	46.90±0.56	3.13±0.11	179.46±0.93	510.19±2.47
108	0.36±0.03	46.90±0.59	3.08±0.12	178.57±0.97	507.23±2.57
109	0.31±0.03	46.90±0.63	3.05±0.12	177.39±1.05	501.23±2.77
110	0.32±0.03	46.90±0.70	3.25±0.17	175.24±1.12	499.49±2.98
111	0.43±0.03	46.90±0.75	3.17±0.17	173.83±1.20	500.57±3.23
112	0.44±0.03	46.90±0.73	2.73±0.16	168.75±1.13	489.58±3.06
113	0.49±0.03	46.90±0.76	2.58±0.15	163.85±1.15	468.40±3.06
114	0.47±0.03	46.90±0.77	2.73±0.17	162.54±1.15	463.24±3.04
115	0.47±0.04	46.90±0.80	2.21±0.18	163.43±1.19	471.85±3.19
116	0.53±0.04	46.90±0.80	2.73±0.18	164.39±1.19	475.52±3.21
117	0.49±0.04	46.90±0.78	2.66±0.18	168.75±1.20	487.64±3.22
118	0.52±0.03	46.90±0.73	3.12±0.15	172.13±1.15	503.85±3.14
119	0.55±0.03	46.90±0.69	2.78±0.16	172.66±1.06	493.73±2.84
120	0.44±0.03	46.90±0.64	3.03±0.12	173.79±1.03	500.59±2.76
121	0.41±0.03	46.90±0.62	2.86±0.14	175.88±0.99	503.56±2.67
122	0.38±0.03	46.90±0.64	2.94±0.13	176.50±1.04	505.18±2.79
123	0.36±0.03	46.90±0.69	3.24±0.17	175.43±1.10	502.43±2.94
124	0.37±0.03	46.90±0.73	3.32±0.19	176.78±1.18	506.68±3.16
125	0.34±0.03	46.90±0.76	3.64±0.22	179.39±1.22	517.40±3.30
126	0.32±0.04	46.90±0.78	2.92±0.19	179.87±1.27	521.67±3.46
127	0.33±0.04	46.90±0.78	2.89±0.19	179.81±1.27	524.98±3.48
128	0.30±0.03	46.90±0.73	2.90±0.15	179.04±1.21	519.89±3.29
129	0.27±0.03	46.90±0.77	2.99±0.17	176.60±1.27	514.20±3.43
130	0.25±0.04	46.90±0.79	3.44±0.18	178.10±1.32	515.99±3.57
131	0.25±0.04	46.90±0.79	3.35±0.18	183.94±1.35	538.83±3.69
132	0.33±0.04	46.90±0.84	3.74±0.21	187.66±1.44	555.13±3.99

Tabela A.1: Coeficiente de extinção interestelar e fluxos relativos a $H\beta$ [$F(H\beta) = 100$] corrigidos para extinção interestelar em 30 Doradus

Abertura	$C(H\beta)$	$F(H\gamma)$	$F(\lambda 4363)$	$F(\lambda 4959)$	$F(\lambda 5007)$
133	0.31 ± 0.04	46.90 ± 0.80	3.45 ± 0.21	188.19 ± 1.37	558.99 ± 3.82
134	0.36 ± 0.04	46.90 ± 0.80	3.51 ± 0.19	186.76 ± 1.37	557.16 ± 3.83
135	0.30 ± 0.03	46.90 ± 0.75	3.34 ± 0.18	186.42 ± 1.28	549.80 ± 3.53
136	0.27 ± 0.03	46.90 ± 0.71	3.41 ± 0.15	179.49 ± 1.19	527.41 ± 3.27
137	0.18 ± 0.03	46.90 ± 0.71	3.26 ± 0.16	175.46 ± 1.17	510.21 ± 3.18
138	0.20 ± 0.03	46.90 ± 0.72	3.15 ± 0.15	168.36 ± 1.16	489.03 ± 3.11
139	0.18 ± 0.03	46.90 ± 0.77	3.11 ± 0.17	165.32 ± 1.23	483.17 ± 3.31
140	0.23 ± 0.04	46.90 ± 0.79	3.35 ± 0.17	165.21 ± 1.26	484.32 ± 3.41

Tabela A.2: Fluxo absoluto de $H\beta$, razão $[OIII](\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363$ e temperatura eletrônica em 30 Doradus

Abertura	$F(H\beta)^1$	R[OIII]	T_e (K)
1	4.94±0.02	230.62±14.70	9757 ⁺¹⁹⁴ ₋₁₇₄
2	6.74±0.03	242.07±10.92	9620 ⁺¹³¹ ₋₁₂₁
3	6.89±0.03	234.32±10.50	9712 ⁺¹³² ₋₁₂₃
4	7.13±0.03	247.59±12.42	9557 ⁺¹⁴⁴ ₋₁₃₃
5	6.67±0.03	245.44±12.09	9581 ⁺¹⁴³ ₋₁₃₁
6	6.34±0.03	277.28±16.56	9254 ⁺¹⁶² ₋₁₄₇
7	6.28±0.03	266.59±16.77	9357 ⁺¹⁷⁵ ₋₁₅₉
8	6.76±0.03	266.45±16.19	9358 ⁺¹⁶⁹ ₋₁₅₃
9	7.29±0.03	271.54±14.40	9308 ⁺¹⁴⁵ ₋₁₃₃
10	7.41±0.03	322.11±25.33	8881 ⁺²⁰⁰ ₋₁₇₇
11	8.13±0.03	317.60±18.33	8914 ⁺¹⁴⁶ ₋₁₃₂
12	7.82±0.03	294.54±18.45	9099 ⁺¹⁶⁶ ₋₁₄₉
13	6.98±0.03	281.28±16.29	9217 ⁺¹⁵⁶ ₋₁₄₂
14	5.82±0.03	271.11±16.06	9312 ⁺¹⁶³ ₋₁₄₇
15	5.36±0.03	272.48±17.52	9299 ⁺¹⁷⁷ ₋₁₅₉
16	4.68±0.02	271.52±22.28	9308 ⁺²³⁰ ₋₂₀₁
17	4.09±0.02	275.26±23.40	9272 ⁺²³⁸ ₋₂₀₆
18	3.59±0.02	279.99±25.39	9228 ⁺²⁵² ₋₂₁₇
19	2.82±0.02	222.70±21.48	9859 ⁺³⁰⁸ ₋₂₆₃
20	2.33±0.02	278.30±34.85	9244 ⁺³⁶⁰ ₋₂₉₅
21	2.03±0.02	174.61±20.27	10631 ⁺⁴³⁹ ₋₃₆₂
22	2.07±0.02	231.53±29.22	9746 ⁺⁴⁰⁴ ₋₃₂₉
23	2.35±0.02	231.80±28.47	9743 ⁺³⁹¹ ₋₃₂₁
24	2.72±0.02	220.99±25.51	9882 ⁺³⁷⁶ ₋₃₁₂
25	3.84±0.02	192.27±14.24	10311 ⁺²⁵⁴ ₋₂₂₄
26	5.55±0.03	194.80±9.23	10269 ⁺¹⁵⁸ ₋₁₄₄
27	7.66±0.03	198.94±7.79	10203 ⁺¹²⁷ ₋₁₁₉
28	8.90±0.03	208.63±7.49	10055 ⁺¹¹³ ₋₁₀₆
29	9.26±0.03	216.63±7.24	9941 ⁺¹⁰³ ₋₉₆
30	10.30±0.04	224.91±7.07	9830 ⁺⁹⁴ ₋₈₉
31	11.00±0.04	237.81±7.09	9670 ⁺⁸⁶ ₋₈₂
32	12.10±0.04	232.71±6.91	9731 ⁺⁸⁸ ₋₈₂
33	13.70±0.04	254.95±7.26	9476 ⁺⁸⁰ ₋₇₄
34	12.10±0.04	261.67±8.65	9406 ⁺⁹¹ ₋₈₅
35	9.24±0.03	263.32±9.76	9389 ⁺¹⁰² ₋₉₅
36	6.92±0.03	289.66±12.99	9141 ⁺¹¹⁸ ₋₁₀₈
37	5.27±0.03	249.92±11.86	9531 ⁺¹³⁶ ₋₁₂₅
38	5.26±0.03	286.68±21.78	9168 ⁺²⁰⁵ ₋₁₈₂
39	5.35±0.03	284.60±20.57	9186 ⁺¹⁹⁶ ₋₁₇₄
40	5.76±0.03	219.58±13.10	9901 ⁺¹⁸⁶ ₋₁₆₈
41	6.57±0.03	243.21±12.89	9606 ⁺¹⁵⁵ ₋₁₄₁
42	7.18±0.03	246.37±10.93	9570 ⁺¹²⁸ ₋₁₁₇
43	8.71±0.03	232.81±8.73	9730 ⁺¹¹¹ ₋₁₀₃

¹Em unidades de 10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}

Tabela A.2: Fluxo absoluto de $H\beta$, razão $[OIII](\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363$ e temperatura eletrônica em 30 Doradus

Abertura	$F(H\beta)^2$	R[OIII]	T_e (K)
44	11.90±0.04	239.93±7.23	9645 ⁺⁸⁶ ₋₈₂
45	16.00±0.04	220.99±5.98	9882 ⁺⁸² ₋₇₈
46	21.00±0.05	215.76±4.13	9953 ⁺⁵⁸ ₋₅₅
47	27.80±0.06	207.12±3.72	10077 ⁺⁵⁶ ₋₅₃
48	34.80±0.07	207.25±3.06	10075 ⁺⁴⁶ ₋₄₄
49	36.50±0.07	209.99±3.09	10035 ⁺⁴⁵ ₋₄₃
50	32.90±0.06	219.20±3.34	9906 ⁺⁴⁶ ₋₄₄
51	28.40±0.06	225.01±4.20	9829 ⁺⁵⁵ ₋₅₃
52	25.40±0.06	220.80±4.12	9884 ⁺⁵⁶ ₋₅₃
53	24.80±0.06	221.85±4.20	9870 ⁺⁵⁷ ₋₅₄
54	24.10±0.05	219.20±4.13	9906 ⁺⁵⁷ ₋₅₄
55	26.30±0.06	211.45±3.81	10014 ⁺⁵⁵ ₋₅₃
56	29.00±0.06	206.48±3.60	10087 ⁺⁵⁴ ₋₅₂
57	29.40±0.06	208.83±3.67	10052 ⁺⁵⁵ ₋₅₂
58	30.50±0.06	210.59±3.73	10026 ⁺⁵⁵ ₋₅₂
59	30.10±0.06	213.20±3.84	9989 ⁺⁵⁵ ₋₅₂
60	29.30±0.06	213.97±3.89	9978 ⁺⁵⁶ ₋₅₃
61	30.20±0.06	214.62±3.96	9969 ⁺⁵⁶ ₋₅₄
62	29.70±0.06	202.05±3.61	10154 ⁺⁵⁷ ₋₅₄
63	31.40±0.06	201.78±3.03	10158 ⁺⁴⁸ ₋₄₅
64	29.60±0.06	212.35±3.28	10001 ⁺⁴⁸ ₋₄₅
65	26.40±0.06	210.66±3.81	10025 ⁺⁵⁶ ₋₅₃
66	25.30±0.06	220.73±4.17	9885 ⁺⁵⁷ ₋₅₄
67	22.60±0.05	219.38±4.16	9904 ⁺⁵⁷ ₋₅₅
68	23.30±0.06	209.47±9.01	10043 ⁺¹³⁶ ₋₁₂₆
69	21.10±0.10	203.76±28.30	10128 ⁺⁴⁸⁶ ₋₃₈₈
70	21.30±0.18	216.66±77.57	9941 ⁺¹⁵²⁹ ₋₈₃₈
71	19.20±0.10	214.15±34.79	9976 ⁺⁵⁶⁴ ₋₄₃₃
72	18.20±0.05	214.68±8.91	9968 ⁺¹²⁹ ₋₁₂₀
73	19.00±0.05	209.58±5.84	10041 ⁺⁸⁷ ₋₈₂
74	19.20±0.05	218.10±5.62	9921 ⁺⁷⁸ ₋₇₄
75	15.20±0.04	231.14±7.89	9751 ⁺¹⁰¹ ₋₉₅
76	15.10±0.04	227.87±6.91	9792 ⁺⁹⁰ ₋₈₅
77	16.60±0.05	232.81±5.63	9730 ⁺⁷¹ ₋₆₇
78	17.20±0.05	245.93±6.25	9575 ⁺⁷² ₋₆₈
79	17.70±0.05	232.86±5.58	9729 ⁺⁷¹ ₋₆₆
80	19.70±0.05	240.07±5.05	9643 ⁺⁶⁰ ₋₅₈
81	22.60±0.05	229.75±4.61	9768 ⁺⁵⁹ ₋₅₆
82	26.00±0.06	224.65±4.36	9833 ⁺⁵⁸ ₋₅₄
83	30.00±0.06	228.71±4.42	9781 ⁺⁵⁷ ₋₅₄
84	31.10±0.06	216.48±3.33	9943 ⁺⁴⁷ ₋₄₄
85	32.00±0.06	218.57±3.49	9914 ⁺⁴⁹ ₋₄₆
86	29.30±0.06	213.41±3.45	9986 ⁺⁵⁰ ₋₄₇

²Em unidades de 10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}

Tabela A.2: Fluxo absoluto de $H\beta$, razão $[OIII](\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363$ e temperatura eletrônica em 30 Doradus

Abertura	$F(H\beta)^3$	R[OIII]	T_e (K)
87	27.40±0.06	211.94±4.13	10007 ⁺⁶⁰ ₋₅₇
88	25.00±0.06	213.50±4.21	9985 ⁺⁶⁰ ₋₅₈
89	24.00±0.05	228.81±4.83	9780 ⁺⁶² ₋₅₉
90	22.20±0.05	215.20±4.29	9961 ⁺⁶¹ ₋₅₈
91	20.20±0.05	219.67±4.47	9900 ⁺⁶¹ ₋₅₉
92	20.20±0.05	216.49±4.33	9943 ⁺⁶¹ ₋₅₈
93	20.90±0.05	220.71±4.47	9885 ⁺⁶¹ ₋₅₇
94	22.30±0.05	219.43±4.40	9903 ⁺⁶⁰ ₋₅₈
95	24.10±0.05	215.86±4.26	9952 ⁺⁶⁰ ₋₅₈
96	25.00±0.06	219.24±4.37	9905 ⁺⁶¹ ₋₅₇
97	27.10±0.06	210.37±4.07	10030 ⁺⁵⁹ ₋₅₇
98	26.40±0.06	203.75±3.84	10128 ⁺⁵⁹ ₋₅₇
99	24.90±0.06	208.66±4.03	10055 ⁺⁶⁰ ₋₅₈
100	23.10±0.05	210.97±4.06	10021 ⁺⁵⁹ ₋₅₇
101	17.60±0.05	221.65±5.15	9873 ⁺⁷⁰ ₋₆₆
102	15.70±0.04	222.36±5.17	9864 ⁺⁶⁹ ₋₆₇
103	13.30±0.04	225.63±6.07	9821 ⁺⁸⁰ ₋₇₆
104	11.20±0.04	218.23±6.29	9919 ⁺⁸⁸ ₋₈₃
105	9.60±0.03	219.82±7.00	9898 ⁺⁹⁶ ₋₉₁
106	8.33±0.03	207.12±6.84	10077 ⁺¹⁰⁵ ₋₉₈
107	7.85±0.03	220.56±7.80	9888 ⁺¹⁰⁷ ₋₁₀₁
108	7.18±0.03	222.89±8.73	9857 ⁺¹¹⁸ ₋₁₁₁
109	6.11±0.03	222.57±8.81	9861 ⁺¹²⁰ ₋₁₁₂
110	5.22±0.03	207.52±10.90	10071 ⁺¹⁶⁹ ₋₁₅₄
111	4.52±0.02	212.54±11.45	9998 ⁺¹⁷¹ ₋₁₅₅
112	4.76±0.02	241.41±14.20	9627 ⁺¹⁷³ ₋₁₅₇
113	4.40±0.02	245.53±14.33	9580 ⁺¹⁷⁰ ₋₁₅₄
114	4.39±0.02	228.86±14.30	9779 ⁺¹⁹¹ ₋₁₇₁
115	4.20±0.02	287.19±23.44	9163 ⁺²²² ₋₁₉₄
116	4.24±0.02	234.29±15.50	9712 ⁺²⁰⁰ ₋₁₇₉
117	4.38±0.02	246.88±16.76	9565 ⁺¹⁹⁹ ₋₁₇₈
118	4.86±0.02	216.44±10.46	9944 ⁺¹⁵⁰ ₋₁₃₉
119	5.75±0.03	239.59±13.83	9649 ⁺¹⁷⁰ ₋₁₅₅
120	6.15±0.03	222.40±8.86	9863 ⁺¹²¹ ₋₁₁₃
121	6.61±0.03	237.56±11.67	9672 ⁺¹⁴⁵ ₋₁₃₃
122	6.07±0.03	231.64±10.29	9745 ⁺¹³² ₋₁₂₃
123	5.44±0.03	208.95±11.01	10050 ⁺¹⁶⁸ ₋₁₅₃
124	4.82±0.02	205.76±11.82	10097 ⁺¹⁸⁷ ₋₁₆₈
125	4.59±0.02	191.58±11.62	10323 ⁺²⁰⁶ ₋₁₈₆
126	4.23±0.02	239.94±15.66	9644 ⁺¹⁹⁴ ₋₁₇₃
127	4.24±0.02	243.90±16.09	9599 ⁺¹⁹⁴ ₋₁₇₄
128	4.61±0.02	241.08±12.53	9631 ⁺¹⁵³ ₋₁₃₉
129	4.16±0.02	230.69±13.17	9756 ⁺¹⁷³ ₋₁₅₆

³Em unidades de 10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}

Tabela A.2: Fluxo absoluto de $H\beta$, razão $[OIII](\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363$ e temperatura eletrônica em 30 Doradus

Abertura	$F(H\beta)^4$	R[OIII]	T_e (K)
130	3.88 ± 0.02	201.72 ± 10.61	10159^{+172}_{-157}
131	3.91 ± 0.02	215.59 ± 11.64	9956^{+169}_{-155}
132	3.57 ± 0.02	198.49 ± 11.20	10210^{+186}_{-170}
133	3.95 ± 0.02	216.77 ± 13.25	9939^{+193}_{-173}
134	3.93 ± 0.02	212.14 ± 11.54	10004^{+173}_{-157}
135	4.43 ± 0.02	220.15 ± 11.92	9893^{+168}_{-153}
136	4.79 ± 0.02	207.24 ± 9.17	10076^{+140}_{-131}
137	4.74 ± 0.02	210.25 ± 10.37	10031^{+157}_{-143}
138	4.57 ± 0.02	208.77 ± 10.00	10053^{+152}_{-140}
139	4.02 ± 0.02	208.66 ± 11.46	10055^{+175}_{-161}
140	3.79 ± 0.02	193.94 ± 9.90	10284^{+170}_{-156}

⁴Em unidades de 10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}