

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
DEPARTAMENTO DE ASTRONOMIA

Estudo da cinemática e população estelar
do par de galáxias em interação
AM2058-381*

Cecília Petinga Irala

Dissertação realizada sob orientação da Professora Dra. Miriani G. Pastoriza e apresentada ao curso de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Física.

Porto Alegre, RS, Brasil
Junho de 2011

* Trabalho financiado pela CAPES

Para meus pais Cora e Sidnei, sempre.

Agradecimentos

Nestes dois anos de percurso muitas pessoas passaram pelo meu caminho e ajudaram de alguma forma, seja profissional ou emocionalmente. Por isso, eu agradeço em especial:

Aos meus pais, Cora e Sidnei Irala, pelo apoio incondicional e suporte emocional neste e em todos os momentos da minha vida.

Aos meus irmãos Lúcia, Diogo e Márcia por todo apoio e carinho nas horas mais difíceis.

À minha orientadora Miriani Pastoriza por ter muita paciência comigo e por aceitar orientar uma pessoa que não tinha a mínima experiência em astronomia.

Ao Rogério Riffel por me ajudar muito principalmente na parte computacional, que foi desde o básico de linux até usar o STARLIGHT e facilitar minha vida com seus programinhas mágicos.

À Angela Krabbe pela paciência de escrever infinitos e-mails para realizar discussões e ensinar procedimentos referentes a este trabalho.

Ao colega José Andrés por contribuir com o capítulo 4 deste trabalho.

Aos demais colegas do Departamento de Astronomia, que de alguma forma contribuíram para este trabalho, seja com sugestões ou por compartilhar momentos de sufoco nas disciplinas em comum.

Aos meus colegas e amigos de longa data Danusa e Diego pelos momentos necessários de desabafo e descontração.

À minha amiga Adriana, por todo apoio e amizade.

À minha amiga Patrícia pela amizade e apoio mesmo através de infinitas conversas pela internet.

Ao Cristian pelo carinho, amizade, apoio e momentos de descontração nesta fase escrita da dissertação.

Aos colegas da sala M206 por terem contribuído de alguma forma para este trabalho.

Resumo

Realizamos um estudo observacional sobre a cinemática e o histórico de formação estelar das galáxias do par AM2058-381. Os dados utilizados consistem de espectros de fenda longa obtidos com Gemini Multi-Object Spectrograph (GMOS) anexado ao telescópio Gemini Sul e cobrem um intervalo espectral de 3300 a 6930 Å. Foram extraídos e analisados 69 espectros unidimensionais. A região observada em cada espectro representa uma área de $918 \times 785 \text{ pc}^2$ para AM2058A e $930 \times 795 \text{ pc}^2$ para AM2058B. Construimos as curvas de rotação para as galáxias do par através das linhas de emissão mais brilhantes do espectro. A velocidade sistêmica encontrada para AM2058A foi $v_s=12178 \text{ km s}^{-1}$ e para AM2058B foi $v_s=12316 \text{ km s}^{-1}$, adotando $H_0=75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, encontramos que a galáxia principal está a uma distância de 162 Mpc e a companheira de 164 Mpc. Determinamos que a galáxia principal está inclinada a um ângulo $i=68^\circ$ e estimamos sua velocidade circular máxima em $v_c=314 \text{ km s}^{-1}$ através do ajuste de mínimo quadrados não-linear para curva de rotação, assumindo que o gás se move sob um potencial gravitacional logarítmico. Para a galáxia companheira não foi possível realizar o ajuste, pois o campo de velocidades é muito complexo. A velocidade circular máxima desprojetada nos permitiu obter a massa dinâmica para a galáxia AM2058A em $\mathcal{M}_A(r) = 2.1 \times 10^{11} \mathcal{M}_\odot$. A massa da galáxia companheira foi estimada em $\mathcal{M}_B(r) = 4.6 \times 10^{10} \mathcal{M}_\odot$ através de parâmetros fotométricos. A razão entre as massas de $\frac{\mathcal{M}_B}{\mathcal{M}_A} = 0.21$ confirma que o par é uma fusão menor (*minor merger*). Realizamos um estudo da população estelar para as diferentes orientações da fenda de ambas galáxias. Encontramos que a região central da galáxia principal AM2058A, por onde passam as fendas nas posições PA=42° e PA=350°, é dominada pela população estelar velha com metalicidade solar e subsolar. A síntese de população estelar do disco e braços espirais da galáxia principal apresenta diferentes distribuições de idades pesadas em luz. Na direção do PA=42°, a contribuição dominante é de idade intermediária com a metalicidade maior que solar. Já a população dominante na direção do PA=350° é jovem com metalicidade subsolar. Considerando que PA=350° passa pelo centro das duas galáxias, o

excesso de formação estelar recente, observado nesta direção, poderia ser o resultado da passagem da galáxia companheira através da galáxia principal. Além disso, observamos que a população estelar da galáxia companheira também apresenta metalicidade subsolar. A população estelar encontrada através da síntese para as três regiões HII estudadas neste trabalho tem idade de $5 M_{anos}$ e metalicidade subsolar. É importante salientar que estas regiões apresentam uma cinemática diferenciada em relação ao disco da galáxia, como se infere das curvas de rotação. A região HII $n^{\circ} 4$ mostra que o último evento de formação estelar da galáxia principal ocorreu há $1 M_{anos}$.

Abstract

We carried out an observational study of the kinematics and star formation history of the galaxy pair AM2058-381. The data used consist of long slit spectra obtained with the Gemini Multi-Object Spectrograph (GMOS) attached to the Gemini South Telescope, covering the spectral range from 3300 to 6930 Å. 69 one-dimensional spectra were extracted and analyzed. The observed region in each spectrum represents an area of $918 \times 785 pc^2$ for AM2058A and $930 \times 795 pc^2$ for AM2058B. We construct the rotation curve for the galaxies using the brightest emission lines in the spectra. The systemic velocity for the galaxies was found to be $v_s=12178 km s^{-1}$ and $v_s=12316 km s^{-1}$ for the main and secondary components. Adopting $H_0=75 km s^{-1}Mpc^{-1}$, we determined that the main galaxy is distant 162 Mpc and the companion 164 Mpc. The inclination of the main galaxy was estimated as $i=68^\circ$. Assuming that the gas of the main component moves under a logarithmic gravitational potential, the maximum circular velocity was found to be $v_c=314 km s^{-1}$. The deprojected maximum circular velocity provides the dynamical mass for the galaxy AM2058A as $\mathcal{M}_A(r) = 2.1 \times 10^{11} \mathcal{M}_\odot$. The mass of the companion galaxy was estimated from photometric parameters as $\mathcal{M}_B(r) = 4.6 \times 10^{10} \mathcal{M}_\odot$. The mass ratio $\frac{\mathcal{M}_B}{\mathcal{M}_A} = 0.21$ confirms that the pair is a minor merger. We performed a stellar population study for the different slit orientations in both galaxies. We found that the central region of the main galaxy AM2058A is dominated by an old stellar population with metallicity $\leq Z_\odot$. The stellar population synthesis of the disk and spiral arms of the main galaxy shows different age distributions. At the direction PA=42°, the dominant contribution comes from the intermediate age with metallicity $\geq Z_\odot$. The dominant population in the direction PA=350° is young with subsolar metallicity. Since PA=350° passes through the center of both galaxies, the excess of recent star formation observed in this direction may be due to the passage of the companion galaxy through the main galaxy. In addition, the main galaxy (along PA=350°) and the secondary show subsolar metallicity. The stellar population found by the synthesis for all three HII regions studied in this work is $5 M_{year}$ old with subsolar metallicity. It is important to note that these regions show

a different kinematics with respect to the galactic disk kinematics, as inferred from rotation curves. The HII region $n^{\circ} 4$ shows that the last event of star formation in the main galaxy occurred about $1 M_{years}$ ago.

Sumário

Sumário	V
Lista de Figuras	VII
Lista de Tabelas	1
1 Introdução	2
1.1 Interações entre pares de galáxias: efeitos cinemáticos	3
1.2 Interação entre pares de galáxias: população estelar e metalicidade .	4
1.3 Galáxias anãs de maré	6
1.4 Objetivos do trabalho	6
2 Observações espectroscópicas e inclinação da galáxia	9
2.1 Dados utilizados	9
2.2 Inclinação das galáxias espirais	11
3 Cinemática do gás das galáxias do par AM2058-381	19
3.1 Determinação da velocidade radial	19
3.2 Curvas de Rotação para as galáxias do par AM2058-381	21
3.2.1 Resultados para AM2058A	23
3.2.2 Resultados para AM2058B	26
4 Modelo para o disco de galáxias espirais	29
4.1 Potencial logarítmico	29
4.2 Ajuste do modelo	34
4.3 Estimativa de Massa do par	36
4.3.1 Determinação de Massa para AM2058A	37
4.3.2 Determinação de massa para AM2058B	38

5	A população estelar do par AM2058-381	40
5.1	Síntese de população estelar	40
5.1.1	Método utilizado	40
5.1.2	A escolha da base	42
5.2	Resultados da síntese de população estelar	42
5.2.1	Resultados da síntese de população estelar para AM2058A	43
5.2.2	Resultado da síntese para o núcleo e regiões HII da galáxia AM2058A	52
5.2.3	Resultados da síntese de população estelar para AM2058B	56
6	Conclusão	68
6.1	Cinemática do gás	68
6.2	História da formação estelar	69
6.3	Perspectivas	71
A	Resultados individuais da síntese para AM2058A: PA=42°	73
B	Resultados individuais da síntese para AM2058A: PA=125°	82
C	Resultados individuais da síntese para AM2058A: PA=350°	89
D	Resultados individuais da síntese para AM2058B: PA=94° e 350°	98
	Referências Bibliográficas	103

Lista de Figuras

1.1	Regiões HII catalogadas por Ferreiro & Pastoriza (2004) para a AM2058A. <i>Painel direito:</i> Imagem em $H\alpha$ da AM2058A obtida por Ferreiro & Pastoriza (2004). <i>Painel esquerdo:</i> Imagem na banda r da AM2058A obtida com o GMOS-Gemini sul.	7
2.1	Imagem na banda r do par AM2058-381 obtida com o GMOS. As fendas estão orientadas em diferentes ângulos de posição.	10
2.2	<i>Painel direito:</i> espectros extraídos ao longo do ângulo de posição $PA=42^\circ$, o fluxo de cada espectro (em unidades de $\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) está dividido pelo fluxo de normalização ($\lambda 4755 \text{ \AA}$). <i>Painel esquerdo:</i> perfil espacial do fluxo no contínuo (linha tracejada) e do fluxo em $H\alpha$ (linhas contínua) para cada posição da fenda (ambos em unidades de $10^{17} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	12
2.3	<i>Painel direito:</i> espectros extraídos ao longo do ângulo de posição $PA=125^\circ$, o fluxo de cada espectro (em unidades de $\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) está dividido pelo fluxo de normalização ($\lambda 4755 \text{ \AA}$). <i>Painel esquerdo:</i> o mesmo que Fig. 2.2	13
2.4	<i>Painel direito:</i> espectros extraídos ao longo do ângulo de posição $PA=350^\circ$, o fluxo de cada espectro (em unidades de $\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) está dividido pelo fluxo de normalização ($\lambda 4755 \text{ \AA}$). <i>Painel esquerdo:</i> o mesmo que Fig. 2.2	14
2.5	<i>Painel direito:</i> espectros extraídos ao longo do ângulo de posição $PA=94^\circ$, o fluxo de cada espectro (em unidades de $\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) está dividido pelo fluxo de normalização ($\lambda 4755 \text{ \AA}$). <i>Painel esquerdo:</i> o mesmo que Fig. 2.2	15

2.6	<i>Painel direito:</i> espectros extraídos ao longo do ângulo de posição PA=350° para a galáxia AM2058B, o fluxo de cada espectro (em unidades de $\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) está dividido pelo fluxo de normalização ($\lambda 4755 \text{ \AA}$). <i>Painel esquerdo:</i> o mesmo que Fig. 2.2	16
2.7	<i>Painel esquerdo:</i> espectro da região HII n° 4 observada em AM2058A com linhas de emissão identificadas. <i>Painel direito:</i> espectro da região nuclear de AM2058A, com linhas de absorção identificadas.	17
2.8	<i>Painel esquerdo:</i> NGC 3982 tem orientação <i>face – on</i> com respeito à linha de visada. <i>Painel direito:</i> NGC891 tem orientação <i>edge – on</i>	18
2.9	(a) Disco da galáxia sem inclinação. (b) Projeção da galáxia no plano do céu, uma elipse com excentricidade e	18
3.1	Figura esquemática da curva de rotação de uma galáxia espiral.	23
3.2	Curva de rotação ao longo do PA=42°. <i>Painel superior:</i> emissão do fluxo em H α (linha contínua) e emissão do fluxo contínuo (linha tracejada), ambos em unidades de $10^{-17} \text{ erg cm}^2\text{s}^{-1}$. <i>Painel inferior:</i> velocidade circular na linha de visada com respeito ao raio da galáxia.	24
3.3	Curva de rotação e emissão de fluxo ao longo do PA=125°. Descrição das figuras ver Fig. 3.2	25
3.4	Curva de rotação e emissão de fluxo ao longo do PA=350°. Descrição das figuras ver Fig. 3.2	26
3.5	Curva de rotação e emissão de fluxo ao longo do PA=94°. Descrição das figuras ver Fig. 3.2	27
3.6	Curva de rotação e emissão de fluxo ao longo do PA=350°. Descrição das figuras ver Fig. 3.2	28
4.1	(a) Ponto r no plano da galáxia. (b) Ponto r projetado em coordenadas polares nos eixos x e y . (c) Galáxia inclinada projetada no plano do céu, vemos r projetado como r' ; (d) ponto r' projetado em coordenadas polares nos eixos x' e y'	31
4.2	Velocidade circular no plano da galáxia decomposta em coordenadas cartesianas.	32
4.3	Ajuste para curva de rotação da galáxia AM2058A (PA=42°): plot do ajuste (linha vermelha) e curva de rotação (pontos).	35
4.4	Ajuste para curva de rotação da galáxia AM2058A (PA=350°): plot do ajuste (linha vermelha) e curva de rotação (pontos).	36

4.5	Razão massa luminosidade como função do tipo de Hubble (Roberts & Haynes, 1994).	38
5.1	Distribuição de idade pesada em luz e em massa para a galáxia AM2058A: PA=42°.	44
5.2	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura a PA=42°.	46
5.3	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura s PA=42°.	47
5.4	Resultados para a contribuição da população estelar média x_j e μ_j , e do A_V ao longo do PA=42°.	48
5.5	Distribuição de idade pesada em luz e em massa para a galáxia AM2058A: PA=125°.	49
5.6	Resultados para a contribuição da população estelar média (x_j e μ_j) e A_V ao longo do PA=125°.	50
5.7	Distribuição de idade pesada em luz e em massa para a galáxia AM2058A: PA=350°.	52
5.8	Resultados para a contribuição da idade média das componentes do vetor de população estelar x_j e μ_j e A_V ao longo do PA=350°.	54
5.9	Resultado da síntese para AM2058A: núcleo	55
5.10	Resultado da síntese para AM2058A: região HII n° 10	57
5.11	Resultado da síntese para AM2058A: região HII n° 4	58
5.12	Resultado da síntese para AM2058A: região HII n° 5	59
5.13	Distribuição de idade pesada em luz e em massa para a galáxia AM2058B: PA=94°.	60
5.14	Resultados para a contribuição da população estelar média (x_j e μ_j) e do A_V ao longo do PA=94°.	61
5.15	Resultado da síntese para AM2058B: Abertura b do PA=94°.	62
5.16	Resultado da síntese para AM2058B: Abertura central do PA=94°.	63
5.17	Resultado da síntese para AM2058B: Abertura e do PA=94°.	64
5.18	Distribuição de idade pesada em luz e em massa para a galáxia AM2058B: PA=350°.	65
5.19	Resultado da síntese para a posição b do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2.	66
5.20	Resultados para a contribuição da população estelar média x_j e μ_j e A_V ao longo do PA=350°.	67

6.1	Relação $\log(R_{23}) \times \log(\text{OII}/\text{OIII})$ (Pagel et al., 1979) para regiões individuais da AM2058-381. As curvas representam modelos de fotoionização obtidos com o código Cloudy/96.03. Onde: $R_{23} = \left[\frac{[\text{OII}]\lambda 3727 + ([\text{OIII}]\lambda 4959 + [\text{OIII}]\lambda 5007)}{\text{H}\beta} \right]$	72
A.1	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura b PA=42°	73
A.2	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura s PA=42°	74
A.3	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura e PA=42°	74
A.4	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura f PA=42°	75
A.5	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura g PA=42°	75
A.6	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura h PA=42°	76
A.7	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura i PA=42°	76
A.8	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura j PA=42°	77
A.9	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura k PA=42°	77
A.10	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura l PA=42°	78
A.11	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura m PA=42°	78
A.12	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura n PA=42°	79
A.13	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura o PA=42°	79
A.14	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura p PA=42°	80
A.15	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura q PA=42°	80
A.16	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura r PA=42°	81
B.1	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura a PA=125°	82
B.2	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura b PA=125°	83
B.3	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura d PA=125°	83
B.4	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura e PA=125°	84
B.5	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura f PA=125°	84
B.6	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura g PA=125°	85
B.7	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura h PA=125°	85
B.8	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura i PA=125°	86
B.9	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura l PA=125°	86
B.10	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura m PA=125°	87
B.11	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura o PA=125°	87
B.12	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura p PA=125°	88
C.1	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura a PA=350°	89
C.2	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura b PA=350°	90

C.3	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura c PA=350°	90
C.4	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura e PA=350°	91
C.5	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura f PA=350°	91
C.6	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura g PA=350°	92
C.7	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura h PA=350°	92
C.8	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura j PA=350°	93
C.9	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura k PA=350°	93
C.10	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura l PA=350°	94
C.11	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura m PA=350°	94
C.12	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura n PA=350°	95
C.13	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura o PA=350°	95
C.14	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura p PA=350°	96
C.15	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura q PA=350°	96
C.16	Resultado da síntese para AM2058A: Abertura r PA=350°	97
D.1	Resultado da síntese para AM2058B: Abertura a PA=94°	98
D.2	Resultado da síntese para AM2058B: Abertura c PA=94°	99
D.3	Resultado da síntese para AM2058B: Abertura d PA=94°	99
D.4	Resultado da síntese para AM2058B: Abertura f PA=94°	100
D.5	Resultado da síntese para AM2058B: Abertura g PA=94°	100
D.6	Resultado da síntese para AM2058B: Abertura a PA=350°	101
D.7	Resultado da síntese para AM2058B: Abertura c PA=350°	101
D.8	Resultado da síntese para AM2058B: Abertura d PA=350°	102

Lista de Tabelas

1.1	Candidatas a galáxias anãs de maré (Ferreiro et al., 2008): região, magnitude absoluta no azul, cor integrada, luminosidade em $H\alpha$, número de fótons ionizantes, idade e taxa de formação estelar.	7
2.1	Dados da observação.	10
3.1	Velocidade radial média para AM2058A: PA=42° e PA=125°	21
3.2	Velocidade radial média para AM2058A: PA=350°	22
3.3	Velocidade radial média para AM2058B: PA=94° e PA=350°	22
4.1	Parâmetros encontrados através do ajuste.	34
4.2	Parâmetros fotométricos obtidos para o par AM2058-381 (Ferreiro & Pastoriza, 2004).	37
5.1	Resultados da síntese para AM2058A: PA=42°.	45
5.2	Resultado da síntese para AM2058A: PA=125°.	51
5.3	Resultados da síntese para AM2058A: PA=350°.	53
5.4	Resultado da síntese para AM2058B: PA=94°.	61
5.5	Resultado da síntese para AM2058B: PA=94°.	67

Capítulo 1

Introdução

É amplamente aceito que eventos de fusão e interação entre galáxias desempenham um importante papel em sua formação e evolução. Se forem levados em conta eventos de interação desde a formação das galáxias, provavelmente existem poucas galáxias que não foram formadas ou modificadas por algum evento de fusão ou interação (Barnes & Hernquist, 1992). Estes efeitos podem ser tão importantes que a posição de uma galáxia na sequência de Hubble pode estar relacionada ao número e à intensidade das interações que ocorreram na sua história passada (Viegas & Oliveira, 2004).

Galáxias não estão distribuídas uniformemente em todo céu, suas associações são comuns e formam sistemas que variam de pares a superaglomerados, que são formados por diversos grupos e aglomerados de galáxias. A grande maioria dos pares é formado por galáxias do tipo espiral, ou seja, um par com componentes espiral+espiral(S+S). No entanto, vários pares de galáxias são formados por objetos com formas diferentes: elíptica+elíptica(E+E), elíptica+lenticular(E+S0), elíptica+espiral(E+S), lenticular+lenticular(S0+S0), e lenticular+espiral(S0+S) (Viegas & Oliveira, 2004).

Quando as galáxias componentes de pares estão muito próximas, as estrelas sofrem uma tendência sistemática a se desacelerarem na direção do seu movimento, este fenômeno é conhecido com fricção dinâmica (Chandrasekhar, 1943) e a interação ocorre pela ação da gravidade, que para objetos extensos é conhecida como *força de maré*. Esta força, em primeira instância produz uma forte perturbação nos sistemas interagentes, como pontes, caudas, centro deslocado e perturbações nas extremidades das galáxias (Arp & Madore, 1987, Struck, 1999).

Os fenômenos decorrentes da interação dependem de fatores como a massa relativa entre as galáxias, separação entre elas e direção da rotação com respeito à

direção da interação com a galáxia companheira. Um encontro na direção prógrada (caminho na mesma direção da rotação) apresenta efeitos mais pronunciados do que um encontro na direção retrógrada (Elmegreen, 1998).

No que diz respeito à massa, a fusão entre galáxias espirais de massa similar (*major mergers*) pode formar uma galáxia elíptica (Schneider, P., 2006). Porém, galáxias elípticas assim formadas apresentam formação estelar recente e ausência de gradiente de metalicidade, o que não se observa naquelas formadas através de colapso monolítico. Estima-se que 10% das galáxias elípticas foram formadas por *major mergers* (Elmegreen, 1998). Eventos de *major mergers* também são responsáveis pela formação de longas caudas de maré (Toomre & Toomre, 1972), o primeiro exemplo de um par de galáxias com este efeito foi NGC 4038/9, descoberto em 1785 por William Herschel, conhecido como *Galáxias Antena*, devido a suas longas caudas de maré formadas pelo efeito da interação.

No centro de aglomerados de galáxias encontram-se galáxias muito massivas ($\mathcal{M} > 10^{11} \mathcal{M}_{\odot}$), como as elípticas gigantes cD. Estas galáxias são 10 vezes maiores que as elípticas normais, pois canibalizam galáxias vizinhas que passam próximo do centro destes aglomerados (Dressler, 1984). Como exemplos destes aglomerados de galáxias, podemos citar os aglomerados de Abell, Virgo e Coma.

Eventos não tão dramáticos mas que ocorrem com maior frequência em nosso universo são as interações menores (*minor mergers*) (Frenk et al., 1988, Carlberg & Couchman, 1989). Estes eventos são caracterizados pela interação de uma galáxia maior com satélites de menor massa, com razão de $0.04 < \mathcal{M}_{\text{companheira}} / \mathcal{M}_{\text{principal}} < 0.2$ (Ferreiro & Pastoriza, 2004). Um exemplo para este tipo de interação é a Via Láctea (MW), ela forma um *minor merger* com as Nuvens de Magalhães (Grande e Pequena), a razão de massas entre elas é de $\mathcal{M}_{LMC} / \mathcal{M}_{MW} \sim 0.1$ (Schwarzkopf & Dettmar, 2000).

1.1 Interações entre pares de galáxias: efeitos cinemáticos

O campo de velocidades de uma galáxia é descrito pelo movimento das estrelas e do gás, gerado por um potencial gravitacional. No disco de galáxias espirais, as estrelas e o gás descrevem órbitas quase circulares em torno do centro de gravidade do sistema.

Quando galáxias se aproximam, a força de maré quebra a simetria do potencial gravitacional, e perturba as órbitas descritas antes da interação (Bournaud, 2010).

Como resposta, o material do disco, em particular o gás, dentro do raio de co-rotação experimenta torques gravitacionais negativos, e perde momento angular, fazendo com que o gás seja dirigido para as regiões centrais da galáxia. Em outras partes do disco, o gás pode ganhar momento angular e ser direcionado para fora da galáxia, formando caudas de maré extensas. As estrelas no disco da galáxia se comportam aproximadamente da mesma forma, mas suas dispersões de velocidade são muito maiores que a do gás, e a dinâmica colisional faz os torques de gravidade serem muito mais fracos (Bournaud, 2010).

Os fluxos de gás provenientes do disco e braços espirais, quando direcionados para a região nuclear da galáxia, podem produzir buracos negros (Kormendy & Richstone, 1995) e formação estelar intensa não encontrada em núcleo de galáxias isoladas (Bournaud et al., 2010). Se direcionados para as regiões externas, podem formar muitas estruturas, como caudas de maré, anéis polares (Whitmore et al., 1990) e pontes de troca de matéria entre as galáxias. A interação entre as galáxias também forma super aglomerados de estrelas e galáxias anãs de maré (Ferreiro et al., 2008).

Estudos feitos através de simulações hidrodinâmicas de N corpos mostram que estas perturbações no campo de velocidade levam a assimetrias nas curvas de rotação (velocidade circular em função do raio da galáxia). No entanto, perturbações significativas não são observáveis após 1 Giga ano (G_{ano}) do primeiro encontro (Kronberger et al., 2006).

Krabbe et al. (2008) estudaram a cinemática do *minor merger* AM2306-721 e encontraram pronunciados desvios na velocidade do gás com respeito ao campo rotacional do disco da galáxia. Estes desvios, da ordem de $v=100 \text{ kms}^{-1}$, coincidem com picos da emissão em $H\alpha$, localizados nas regiões de formação estelar dos braços. Através de simulações hidrodinâmicas de N corpos, eles também encontraram que o estágio atual da interação está em 250 milhões de anos (M_{anos}).

1.2 Interação entre pares de galáxias: população estelar e metalicidade

A população estelar das galáxias pode ser dividida em dois grupos principais (Baade, 1944): População I e população II.

A População I é formada por estrelas de idade jovem e intermediária (até 6 G_{anos}) e ricas em metais ($Z/Z_{\odot}=0.1$ à 2.5). Estas estrelas constituem o disco e os aglomerados abertos de galáxias espirais e galáxias irregulares.

A população II é formada por estrelas velhas ($7 G_{anos}$ à $13 G_{anos}$) e pobres em metais ($Z/Z_{\odot} = 0.0001$ à 0.03). Estas estrelas constituem o halo, o bojo e os aglomerados globulares das galáxias espirais, e também a população estelar das elípticas.

Porém, esta distribuição de idade e metalicidade pode ser modificada por eventos de interação entre galáxias, que levam a novos surtos de formação estelar, consequentemente sua taxa de formação estelar média é maior quando comparada à taxa de formação estelar das galáxias isoladas.

Esta formação estelar em regiões em torno do núcleo, pode mascarar um núcleo Seyfert 2 ou LINER (Pastoriza et al., 1999, Storchi-Bergmann et al., 1996). A metalicidade nestas regiões apresenta decréscimo quando comparada ao núcleo de galáxias isoladas.

Nos braços espirais destas galáxias observa-se complexos de regiões HII muito luminosos. Estes complexos tem massa e luminosidade similares às observadas em galáxias anãs, e são conhecidos como *candidatas a galáxias anãs de maré*. Estas regiões apresentam população estelar muito jovem, e taxa de formação estelar, luminosidade e metalicidade superiores àquelas encontradas em galáxias anãs isoladas (Duc & Mirabel, 1997, 1998).

O movimento do gás causa impacto no enriquecimento químico das galáxias. O fluxo de gás pobre em metais vindo das partes externas da galáxia, contamina as regiões internas ricas em metais provocando um achatamento do gradiente de metalicidade, quando comparado ao gradiente de metalicidade de galáxias isoladas (Krabbe et al., 2008).

Como mostram as simulações numéricas, isto ocorre porque que as interações redistribuem grandes quantidades de matéria para outras regiões da galáxia (Hernquist & Mihos, 1995), e a injeção de material (hidrogênio neutro) em algumas regiões da galáxia pode provocar compressão da matéria que resultará na rápida (e eficiente) formação de nuvens moleculares, e seu subsequente colapso para formar estrelas.

A formação estelar mais intensa é observada em *major mergers*. Porém, também se observa atividade de formação estelar em *minor mergers* (Barnes & Hernquist, 1991). Além disso, recentes estudos de pares de galáxias tem demonstrado que o mecanismo de formação estelar aumenta à medida que as companheiras se aproximam (Freedman Woods et al., 2010).

1.3 Galáxias anãs de maré

As galáxias anãs de maré (TDG - *tidal dwarf galaxy*) são formadas em caudas de maré por materiais expelidos durante a interação (Duc & Mirabel, 1994). A ideia que colisões entre galáxias poderiam ejetar estrelas e gás para o espaço intergalático, e formar galáxias anãs, foi proposta primeiramente por Zwicky (1956) e depois por Schweizer (1978), que encontrou candidatas a galáxias anãs na cauda de maré do par NGC 4038/39 (Galáxias Antena).

As TDGs apresentam cores ópticas azuis, revelando que a população estelar é jovem, e também mostram alta metalicidade comparadas com anãs isoladas, o que indica que elas foram formadas de um gás pré-enriquecido (Duc & Mirabel, 1994).

Estudos sobre a velocidade das TDGs indicam que estes objetos apresentam uma cinemática desacoplada do resto da cauda de maré, e possuem movimentos não circulares (Bournaud et al., 2004).

As candidatas a TDG são caracterizadas pelos seguintes parâmetros: magnitude absoluta mais brilhante que $M_B < -15$ mag, taxa de formação estelar maior que $0.4M_{\odot}/ano$ e luminosidade em $H\alpha$ da ordem de $L(H\alpha) > 10^{39}$ erg s⁻¹ (Ferreiro et al., 2008).

1.4 Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho é estudar qualitativa e quantitativamente a cinemática e população estelar das galáxias do par em interação AM2058-381. Este par foi selecionado da lista de *minor mergers* estudados por Ferreiro & Pastoriza (2004), Ferreiro et al. (2008), por apresentar várias regiões de formação estelar com idade, luminosidade e taxa de formação estelar comparáveis com galáxias anãs de maré (Ferreiro et al., 2008).

O par AM2058-381 faz parte do catálogo de Arp & Madore (1987), classificado como tipo-M51. Existem dois critérios empíricos para classificar um par de galáxias como M51, o primeiro é que a razão entre luminosidade na banda B das componentes do par varia entre 1/30 e 1/3 e a distância entre as galáxias do par não pode exceder duas vezes o diâmetro óptico da galáxia principal (Reshetnikov & Klimanov, 2003). Este par é composto por uma galáxia principal (AM2058A) do tipo espiral e uma companheira (AM2058B) do tipo irregular, com a metade do tamanho da galáxia principal ou menor.

Através de estudos espectroscópicos, Donzelli & Pastoriza (1997) encontraram

que a velocidade sistêmica deste par é de 12383 km s^{-1} e 12460 km s^{-1} para AM2058A e AM2058B com uma distância de 165 Mpc e 166 Mpc ($H_0=75 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$), respectivamente.

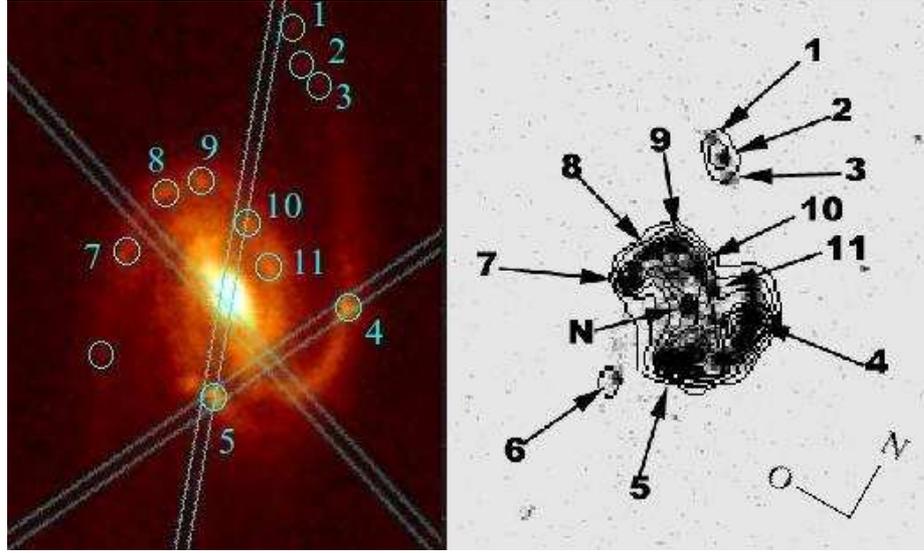


Figura 1.1: Regiões HII catalogadas por Ferreiro & Pastoriza (2004) para a AM2058A. *Painel direito:* Imagem em $H\alpha$ da AM2058A obtida por Ferreiro & Pastoriza (2004). *Painel esquerdo:* Imagem na banda r da AM2058A obtida com o GMOS-Gemini sul.

Tabela 1.1: Candidatas a galáxias anãs de maré (Ferreiro et al., 2008): região, magnitude absoluta no azul, cor integrada, luminosidade em $H\alpha$, número de fótons ionizantes, idade e taxa de formação estelar.

Região	M_B	B-V	$L(H\alpha)$	$Q(H)$	Idade	SFR($H\alpha$)
	(mag)		(erg s^{-1})	(phot s^{-1})	(M_{anos})	(M_{\odot}/ano)
1	-15.13	0.33	1.91×10^{39}	7.24×10^{51}	5.0	1.2×10^{-2}
2	-15.35	0.41	2.5×10^{39}	7.64×10^{51}	5.6	1.6×10^{-2}
3	-15.40	0.31	1.96×10^{39}	5.93×10^{51}	5.0	1.2×10^{-2}
4	-18.14	0.33	1.80×10^{39}	5.53×10^{52}	6.2	1.1×10^{-2}
5	-17.80	0.41	1.12×10^{40}	3.49×10^{52}	6.3	7.1×10^{-2}
6	-15.41	0.44	1.89×10^{39}	5.80×10^{51}	5.1	1.2×10^{-2}
7	-17.12	0.44	6.32×10^{39}	1.92×10^{52}	6.3	4.0×10^{-2}
8	-17.34	0.46	5.68×10^{39}	1.71×10^{52}	6.5	3.6×10^{-2}
9	-17.41	0.50	6.32×10^{39}	1.92×10^{52}	3.7	4.0×10^{-2}
10	-17.56	0.58	6.64×10^{39}	2.01×10^{52}	3.6	4.2×10^{-2}
11	-17.10	0.58	3.32×10^{39}	1.01×10^{52}	4.0	2.1×10^{-2}

Ferreiro & Pastoriza (2004) fizeram um estudo de 12 pares de galáxias através de fotometria integrada, e encontraram que a cor integrada de AM2058A é $(B-V)=0.6$, e

a magnitude visual absoluta é de $M_B = -21.38$ mag. A galáxia companheira AM2058B têm cor integrada $(B-V) = 0.4$ e magnitude visual absoluta de $M_B = -20.07$ mag. Eles também encontraram que a AM2058A apresenta 11 regiões HII muito brilhantes ao longo dos braços espirais. Posteriormente, Ferreira et al. (2008) sugeriram que as regiões HII com luminosidade $H\alpha$ da ordem de $L(H\alpha) > 10^{39}$ erg s⁻¹ poderiam ser candidatas a *TDGs*. As idades destas regiões são menores que $7 M_{anos}$, e apresentam alta taxa de formação estelar ($> 0.1 M_{\odot}/ano$) quando comparadas a galáxias isoladas (Temporin et al., 2003). Os parâmetros encontrados para estas regiões estão listados na Tabela 1.1, onde: n° são os números referentes as regiões HII identificadas na Fig. 1.1, M_B é a magnitude absoluta visual, $B-V$ é a cor integrada da região, $L(H\alpha)$ é a luminosidade em $H\alpha$, $Q(H)$ é o número de fótons ionizantes para esta região, idade e a taxa de formação estelar (*SFR - Star formation rate*) medida através da linha $H\alpha$.

Para que uma candidata a galáxia anã de maré se torne uma galáxia anã, é necessário que ela se torne auto gravitante (Hibbard et al., 2005). Inúmeras simulações numéricas mostram que estes tipos de objetos são encontrados como efeito de interações entre galáxias em *major merger*, como o caso das galáxias antena.

Entretanto, objetos com luminosidades em $H\alpha$ comparadas as TDGs são encontrados em interações menores (Ferreira et al., 2008). Por isso, é importante estudar a cinemática e a formação estelar destes objetos para acompanhar sua evolução e determinar se poderiam ou não formar-se como sistemas gravitacionais independentes da galáxia progenitora.

Capítulo 2

Observações espectroscópicas e inclinação da galáxia

2.1 Dados utilizados

As observações espectroscópicas cobrem o intervalo de 3300 a 6930 Å, e foram obtidas com o Gemini Multi-Object Spectrograph (GMOS) anexado ao telescópio Gemini Sul. Os dados referentes à observação estão listados na tabela 2.1. A largura da fenda é de 1" e a resolução espectral é de 5 Å.

As fendas foram posicionadas em diferentes ângulos de posição (PA¹), como ilustra a Fig. 2.1. PA=42° foi orientada ao longo dos braços espirais e do disco da galáxia principal. Já PA=125° foi orientada de maneira a obter espectros das regiões HII 4 e 5 muito luminosas (ver Fig. 1.1). A fenda no ângulo de posição PA=350° passa por ambas as galáxias, e está orientada de modo a obter espectros do núcleo da galáxia principal e das regiões HII *n*° 5 e 10. Para a galáxia companheira, a fenda foi orientada em dois ângulos de posição, PA=94° e PA=350°, ao longo dos semieixos maior e menor, respectivamente.

Foram extraídos 18 espectros unidimensionais ao longo da fenda PA=42°, 16 para PA=125° e 23 para PA=350°, totalizando 57 espectros ao longo das diferentes posições da fenda para AM2058A. Para AM2058B foram extraídos 7 espectros unidimensionais para PA=94° e 5 para PA=350°, totalizando 12 espectros ao longo das duas PAs. Estes espectros foram extraídos combinando 4 pixels (para aumentar o sinal/ruído), resultando em uma escala espacial de 0.29"pxl⁻¹ e uma dispersão de 0.9Åpxl⁻¹. Cada espectro representa uma abertura de 1"×1.17". Assumindo uma distância de 162 Mpc para AM2058A e 164 Mpc para AM2058B, estimadas a

¹Do inglês *Position angle*.

partir da velocidade sistêmica (ver Cap. 3), cada abertura corresponde a uma área de $918 \times 785 \text{ pc}^2$ para a AM2058A e $930 \times 795 \text{ pc}^2$ para a AM2058B.

O centro de cada fenda foi adotado como a região que mais se aproxima do núcleo da galáxia, podendo ser encontrado analisando o comportamento do perfil espacial no contínuo (em $\lambda=5735 \text{ \AA}$), pois no núcleo (ou o mais próximo dele) a emissão do contínuo é máxima.

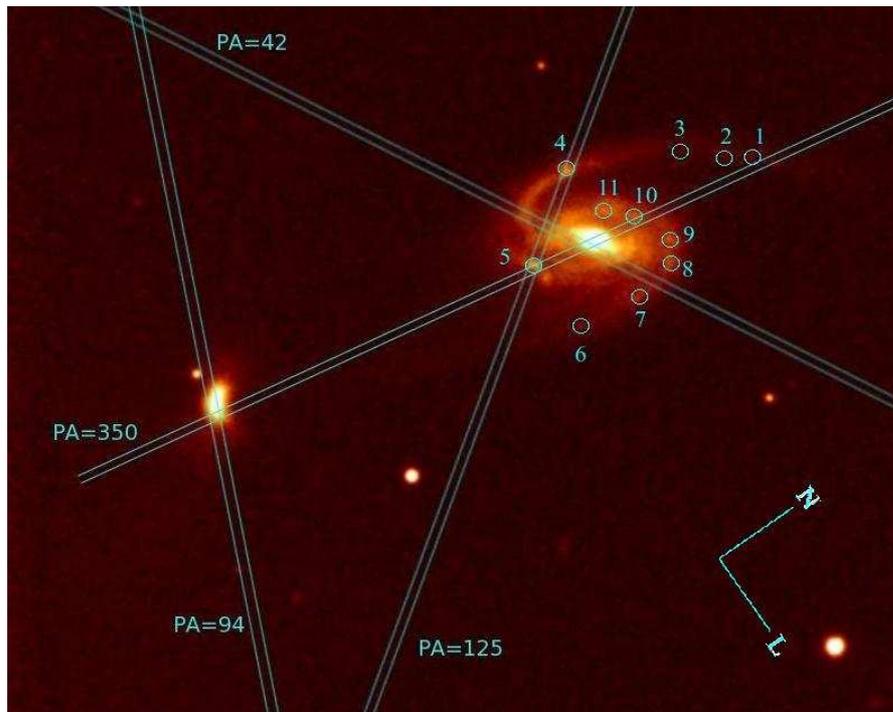


Figura 2.1: Imagem na banda r do par AM2058-381 obtida com o GMOS. As fendas estão orientadas em diferentes ângulos de posição.

Tabela 2.1: Dados da observação.

Data	Tempo de exposição(s)	PA($^{\circ}$)	$\Delta\lambda(\text{\AA})$
24/06/2007	600	42	3300-6090
24/06/2007	600	125	3300-6090
24/06/2007	600	94	3300-6090
25/06/2007	600	350	3300-6090
20/05/2007	600	42	4170-7130
24/05/2007	600	125	4170-7130
30/05/2007	600	94	4170-7130
30/05/2007	600	350	4170-7130

Os espectros extraídos ao longo das fendas (normalizados em 4750 \AA) e o perfil espacial da linha de emissão $H\alpha$ de cada espectro e a emissão do contínuo em 5735

Ã são apresentados nas Figuras 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6, respectivamente. O pico na emissão do contínuo corresponde à abertura que passa ou mais se aproxima do núcleo da galáxia, e os picos na emissão do fluxo em $H\alpha$ correspondem a regiões HII muito luminosas e aos braços espirais de AM2058A. Nos espectros unidimensionais foram observadas as linhas de emissão e absorção que estão identificadas na Fig. 2.7.

2.2 Inclinação das galáxias espirais

Galáxias espirais são aleatoriamente inclinadas com relação à linha de visada, e sua forma aparente varia de acordo com o ângulo de inclinação. As galáxias com inclinação de 90° são chamadas *edge-on* (Fig. 2.8 *painel direito*), e com inclinação 0° são chamadas *face-on* (Fig. 2.8 *painel esquerdo*). O disco de uma galáxia espiral é essencialmente circular ($a=b=1$) quando visto *face-on*; quando inclinado, apresenta semieixos diferentes, $b < a$. Nas galáxias *face-on* não observamos a projeção dos movimentos rotacionais. Por isso, para obtermos uma boa informação cinemática a galáxia deve ter uma inclinação mínima de 45° (Elmegreen, 1998).

Assumindo que o disco da galáxia é circular (Fig. 2.2 a) , e sua projeção no plano do céu é uma elipse (Fig. 2.2 b), temos que para uma elipse, a distância entre um dos focos e um certo ponto P é igual a duas vezes a distância focal, que no caso das galáxias, equivale ao eixo maior a . O semieixo menor, é definido como b , e temos que o ângulo entre b e a definem a excentricidade angular da elipse:

$$\cos i = \left(\frac{b}{a}\right). \quad (2.1)$$

A medida dos semieixos a e b podem ser obtidos mediante o ajuste de isophotas na imagem da galáxia.

Os semieixos maior e menor da galáxia principal AM2058A foram medidos sobre a imagem de aquisição, resultando em $i=68^\circ$. Como a galáxia secundária é muito irregular, não podemos determinar sua inclinação.

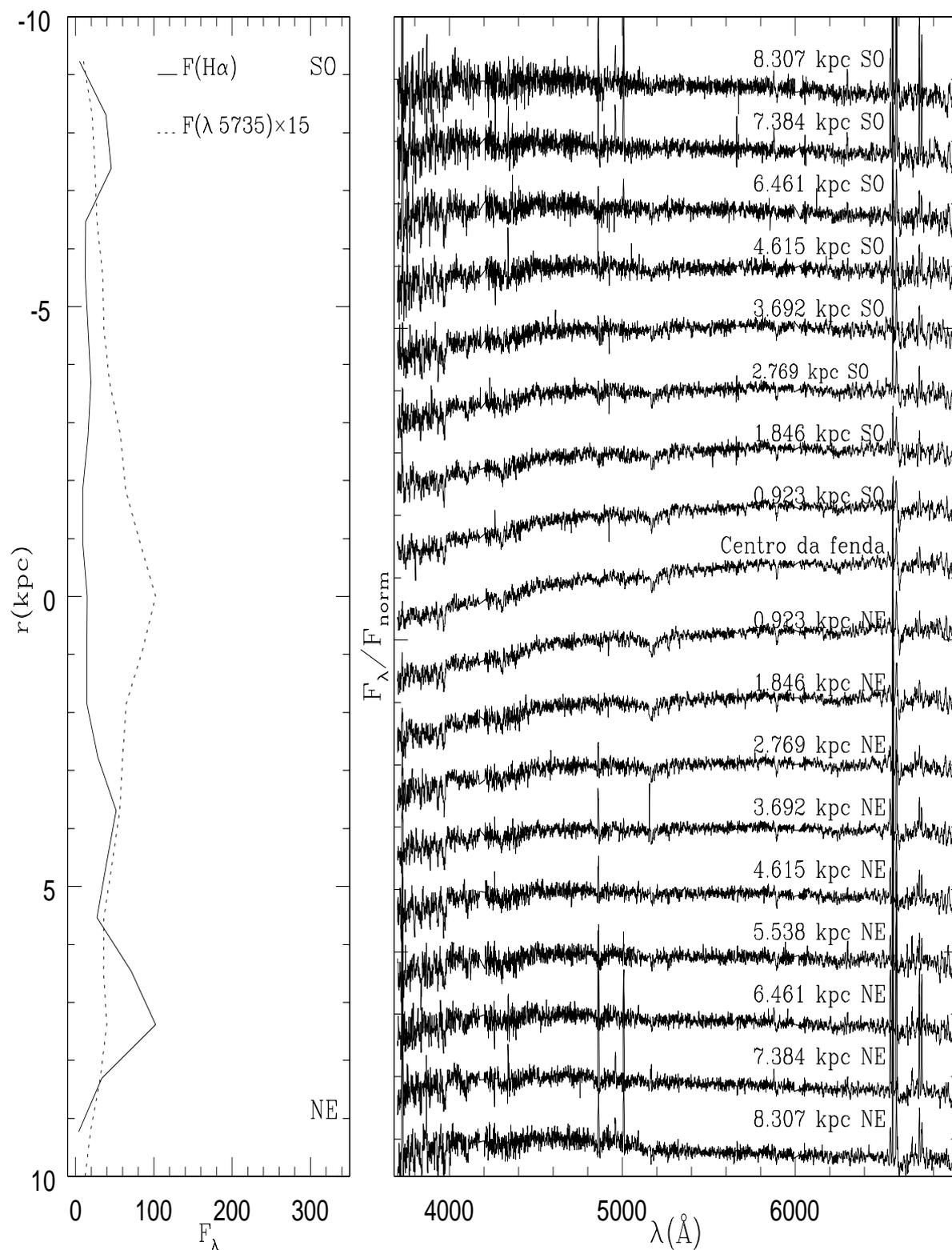


Figura 2.2: *Painel direito*: espectros extraídos ao longo do ângulo de posição $PA=42^\circ$, o fluxo de cada espectro (em unidades de $\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) está dividido pelo fluxo de normalização ($\lambda 4755 \text{ \AA}$). *Painel esquerdo*: perfil espacial do fluxo no contínuo (linha tracejada) e do fluxo em $H\alpha$ (linhas contínua) para cada posição da fenda (ambos em unidades de $10^{17} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

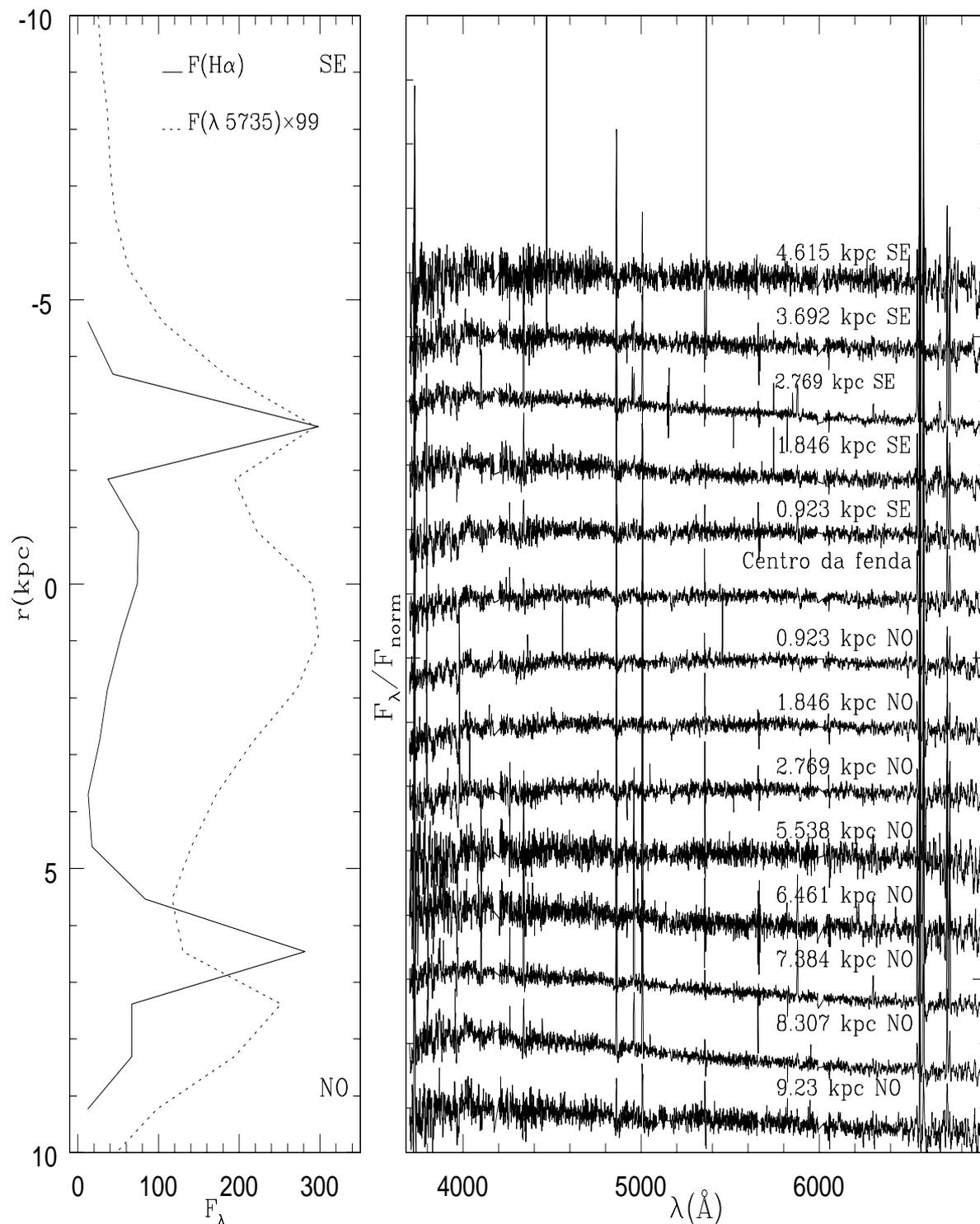


Figura 2.3: *Painel direito*: espectros extraídos ao longo do ângulo de posição $\text{PA}=125^\circ$, o fluxo de cada espectro (em unidades de $\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) está dividido pelo fluxo de normalização ($\lambda 4755 \text{ \AA}$). *Painel esquerdo*: o mesmo que Fig. 2.2

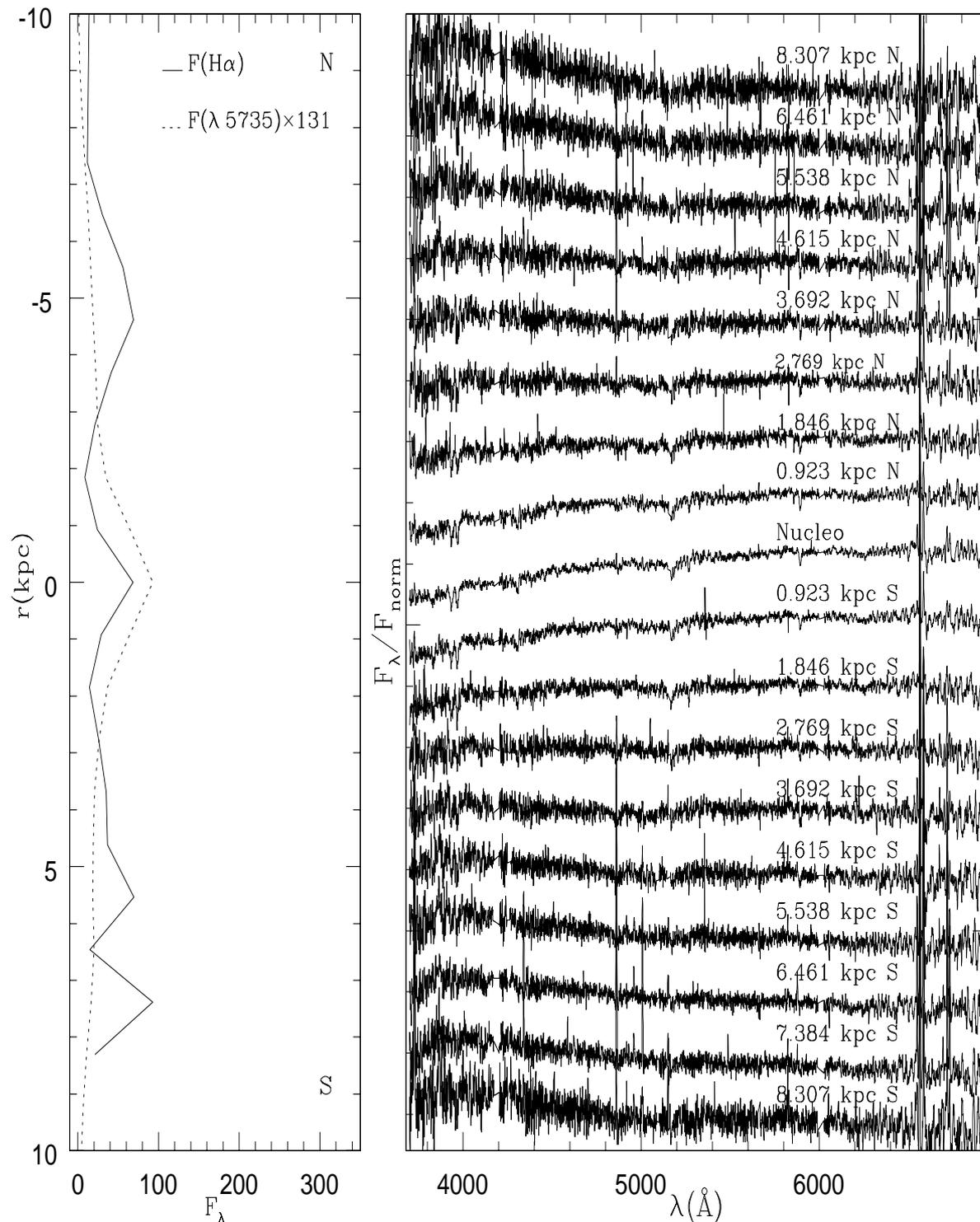


Figura 2.4: *Painel direito*: espectros extraídos ao longo do ângulo de posição $\text{PA}=350^\circ$, o fluxo de cada espectro (em unidades de $\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) está dividido pelo fluxo de normalização ($\lambda 4755 \text{ \AA}$). *Painel esquerdo*: o mesmo que Fig. 2.2

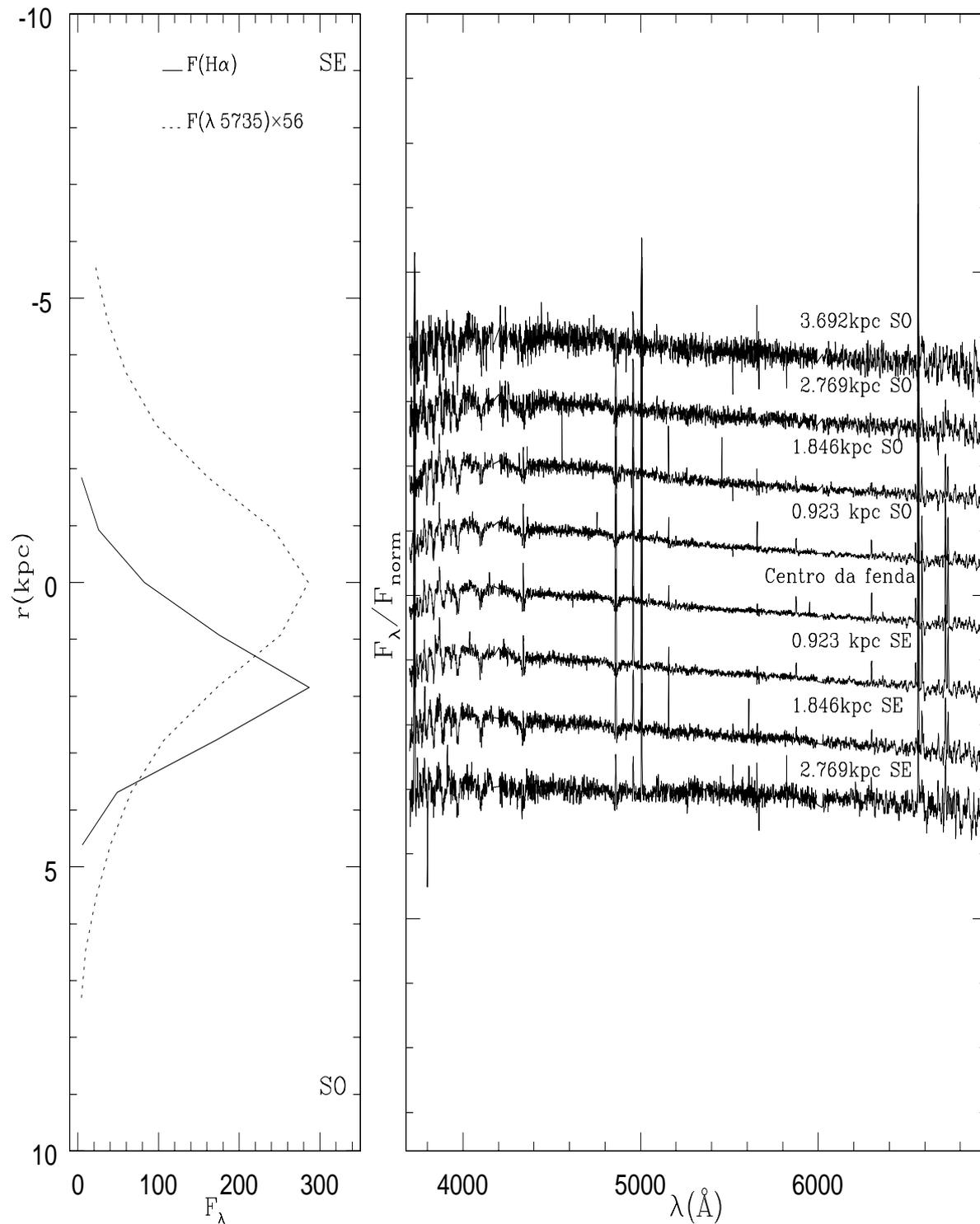


Figura 2.5: *Painel direito:* espectros extraídos ao longo do ângulo de posição $\text{PA}=94^\circ$, o fluxo de cada espectro (em unidades de $\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) está dividido pelo fluxo de normalização ($\lambda 4755 \text{ \AA}$). *Painel esquerdo:* o mesmo que Fig. 2.2

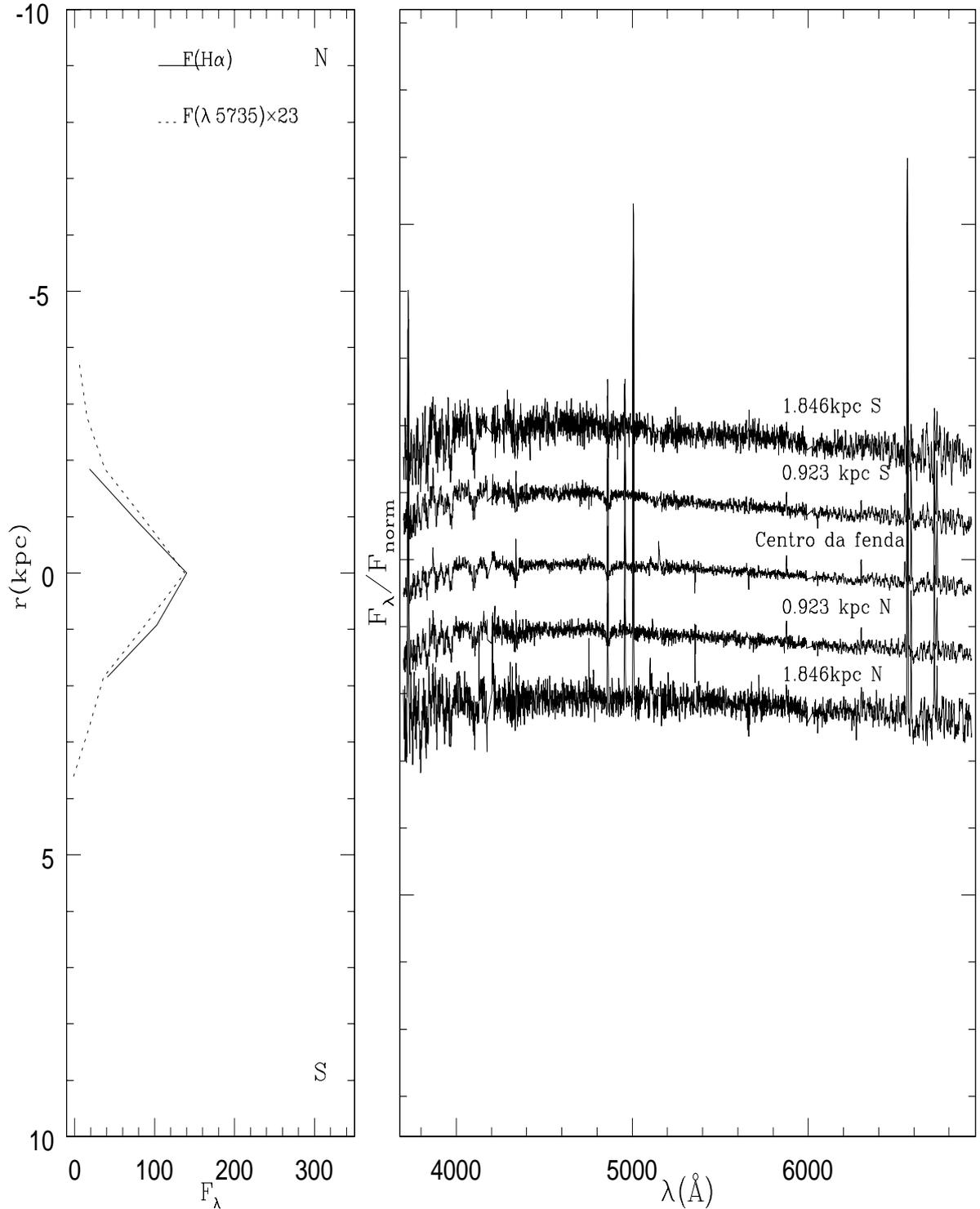


Figura 2.6: *Painel direito*: espectros extraídos ao longo do ângulo de posição $\text{PA}=350^\circ$ para a galáxia AM2058B, o fluxo de cada espectro (em unidades de $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) está dividido pelo fluxo de normalização ($\lambda 4755 \text{\AA}$). *Painel esquerdo*: o mesmo que Fig. 2.2

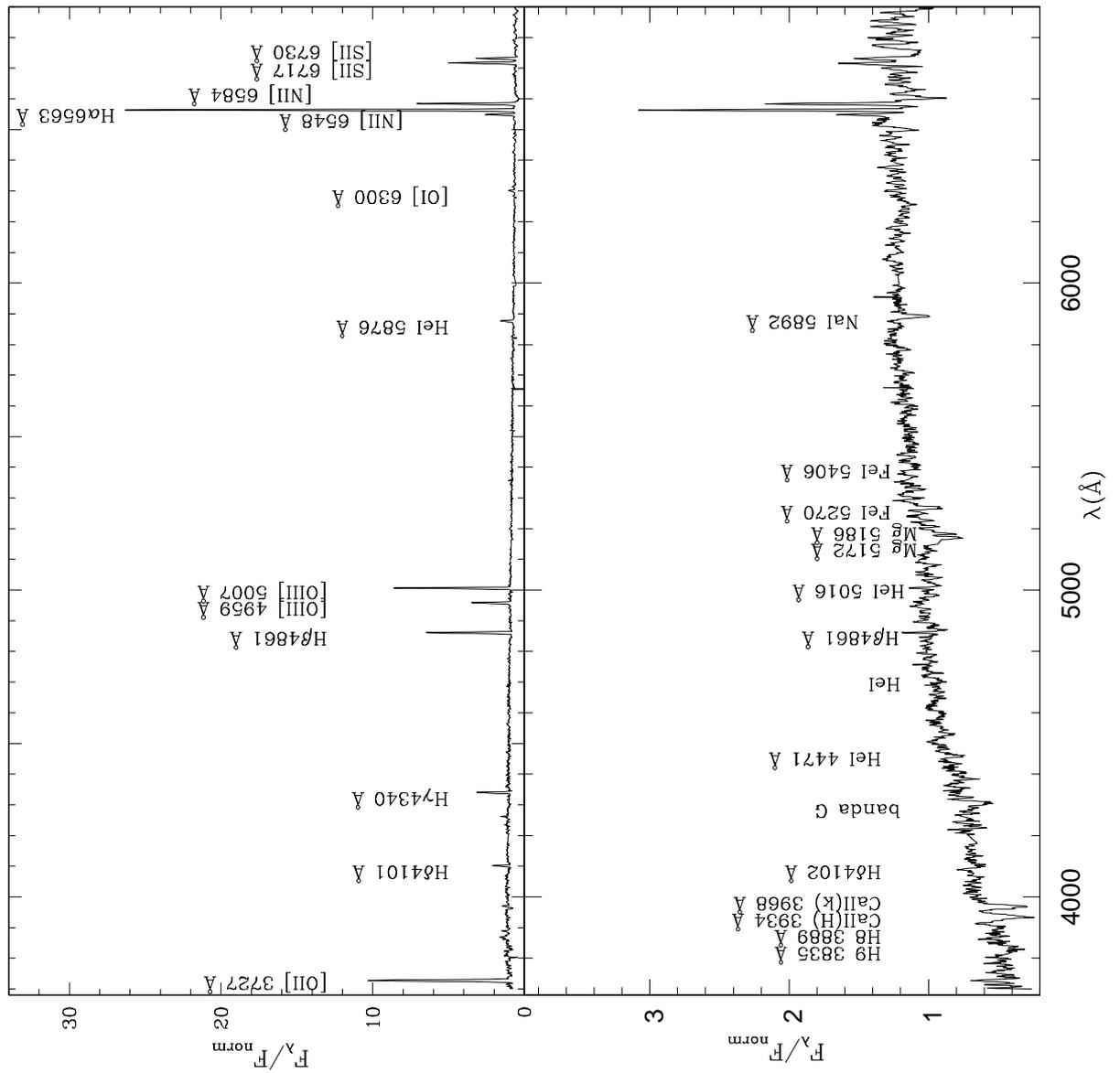


Figura 2.7: *Painel esquerdo:* espectro da região HII n^o 4 observada em AM2058A com linhas de emissão identificadas. *Painel direito:* espectro da região nuclear de AM2058A, com linhas de absorção identificadas.



Figura 2.8: *Painel esquerdo*: NGC 3982 tem orientação *face – on* com respeito à linha de visada. *Painel direito*: NGC891 tem orientação *edge – on*.

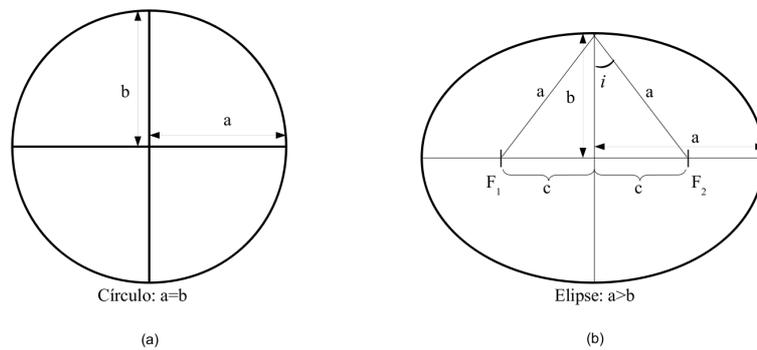


Figura 2.9: (a) Disco da galáxia sem inclinação. (b) Projecção da galáxia no plano do céu, uma elipse com excentricidade e .

Capítulo 3

Cinemática do gás das galáxias do par AM2058-381

Como discutido na seção 1.1, os eventos de interação e fusão entre galáxias deixam assinaturas peculiares na cinemática das componentes. Neste capítulo, estudamos a cinemática do gás do par AM2058-381 .

3.1 Determinação da velocidade radial

O espectro observado de uma galáxia revela as componentes que a formam. As linhas de absorção são originadas principalmente em estrelas, e as linhas de emissão são produzidas nas regiões de Hidrogênio ionizado (regiões HII) localizadas principalmente nos braços espirais.

Hubble (1937) observou que as linhas espectrais das galáxias estão deslocadas para os comprimentos de onda mais vermelhos (*redshift*) devido ao efeito Doppler, e por isso infere-se que as galáxias afastam-se do observador. A velocidade de afastamento da galáxia com respeito ao Sol (velocidade radial), pode ser calculada utilizando a seguinte equação (para movimentos não relativísticos $v_r \ll c$):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c}, \quad (3.1)$$

onde $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$, λ é o comprimento de onda observado e λ_0 é o comprimento de onda de laboratório, v_r é a velocidade radial e c é a velocidade da luz no vácuo.

Para cada galáxia do par AM2058-381, identificamos e medimos o comprimento de onda das linhas de emissão mais brilhantes presentes em cada espectro unidimensional extraído ao longo dos diferentes PAs. Para isso, utilizamos a tarefa *splot* do

IRAF. As linhas de emissão medidas foram: $H\beta$ λ 4861, $[\text{O III}]$ λ 5007, $H\alpha$ λ 6563 e $[\text{N II}]$ λ 6584. Estas linhas estão identificadas no espectro da Fig. 2.7 (ver Sec. 2.1).

Os valores encontrados para as velocidades radiais de cada linha, medidas em cada espectro unidimensional, extraídos ao longo de todos os ângulos de posição, foram corrigidas devido aos movimentos do Sol e da Terra no dia da observação, o que é chamado de *correção heliocêntrica*.

A velocidade radial final foi obtida através da média entre as velocidades radiais das linhas $H\beta$ λ 4861, $[\text{O III}]$ λ 5007, $H\alpha$ λ 6563 e $[\text{N II}]$ λ 6584 para cada espectro ao longo dos diferentes PAs, e os erros das medidas foram obtidos através do desvio padrão em torno da média. A média e o desvio padrão foram obtidos através das equações 3.2 e 3.3, e os valores encontrados para a velocidade radial média e para o desvio padrão em torno da média estão nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (3.2)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}. \quad (3.3)$$

A velocidade sistêmica, que é a velocidade do centro da galáxia com respeito ao Sol, foi aquela encontrada para a extração central (que corresponde ao núcleo da galáxia) da fenda no PA=350° da AM2058A em $v_{sist}=12178 \text{ km s}^{-1}$ e para a extração central da AM2058B em $v_{sist}=12316 \text{ km s}^{-1}$. Donzelli & Pastoriza (1997) encontraram $v_{sist}=12383 \text{ km s}^{-1}$ e $v_{sist}=12460 \text{ km s}^{-1}$ para AM20587A e AM2058B, respectivamente. A diferença de velocidades encontradas entre o presente trabalho e o de Donzelli & Pastoriza (1997) pode ser devida à diferente resolução dos dados espectroscópicos.

Hubble (1929), descobriu que a velocidade sistêmica está correlacionada com a distância da galáxia. Esta relação é conhecida como *Lei de Hubble* e é dada pela seguinte equação:

$$d = \frac{v_s}{H_0}. \quad (3.4)$$

Adotando a constante de Hubble $H_0=75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, encontramos que a AM2058A está à 162 Mpc e a secundária AM2058B está à 164 Mpc.

Tabela 3.1: Velocidade radial média para AM2058A: PA=42° e PA=125°

r(kpc)	v_{radial} (km s ⁻¹)	Desvio padrão
PA=42°		
-8.307	12036.05	7.11
-7.384	12071.10	8.59
-6.461	12082.60	16.66
-4.615	12066.37	12.75
-3.692	12087.84	10.87
-2.769	12110.75	11.82
-1.846	12166.71	18.92
-0.923	12185.83	40.26
0	12173.31	15.70
0.923	12219.12	8.67
1.846	12294.73	34.77
3.692	12336.34	29.14
4.615	12332.08	20.72
5.538	12348.11	14.35
6.461	12373.62	26.45
7.384	12361.05	12.76
8.307	12360.33	12.62
9.23	12390.61	20.27
PA=125°		
11.076	12196.99	22.38
-8.307	12380.00	19.71
-7.384	12353.91	7.23
-4.615	12288.07	19.89
-3.692	12368.07	17.12
-2.769	12354.47	8.63
-1.846	12353.50	15.31
-0.923	12315.08	10.00
0	12353.57	8.26
0.923	12347.74	12.58
1.846	12339.53	5.04
2.769	12297.88	23.07
3.692	12243.06	16.14
4.615	12259.71	4.60
5.538	12233.62	23.95
6.461	12315.16	14.22
7.384	12296.62	12.80
8.307	12256.47	15.94
9.23	12225.41	22.10

3.2 Curvas de Rotação para as galáxias do par AM2058-381

Estudos realizados por Babcock (1939), a partir do deslocamento Doppler das linhas de emissão e absorção do espectro obtido ao longo do eixo maior da galáxia

Tabela 3.2: Velocidade radial média para AM2058A: PA=350°

r(kpc)	$v_{radial}(km s^{-1})$	Desvio padrão
PA=350°		
-21.23	12065.45	7.00
-20.31	12073.67	16.09
-19.38	12063.31	22.74
-18.46	12031.37	20.09
-17.54	12016.85	15.51
-6.461	12044.51	38.84
-5.538	12028.16	17.46
-4.615	12015.00	16.91
-3.692	12032.63	18.01
-2.769	12041.07	11.09
-1.846	12077.40	11.34
-0.923	12148.59	28.87
0	12178.78	18.72
0.923	12213.15	9.92
1.846	12264.68	8.23
2.769	12301.11	3.11
3.692	12309.44	13.07
4.615	12311.79	22.36
5.538	12323.72	13.66
6.461	12329.98	14.99
7.384	12331.47	11.03
8.307	12348.09	10.21

Tabela 3.3: Velocidade radial média para AM2058B: PA=94° e PA=350°

r(kpc)	$v_{radial}(km s^{-1})$	Desvio padrão
PA=94°		
-2.769	12351.34	16.48
-1.846	12312.12	18.63
-0.923	12316.68	14.85
0	12316.40	16.64
0.923	12311.84	16.05
1.846	12326.61	16.22
2.769	12349.10	20.90
PA=350°		
-1.846	12345.93	55.80
-0.923	12340.46	28.43
0	12329.68	15.43
0.923	12315.27	16.36
1.846	12292.19	12.77
2.769	12281.08	8.56
3.692	12290.21	21.22

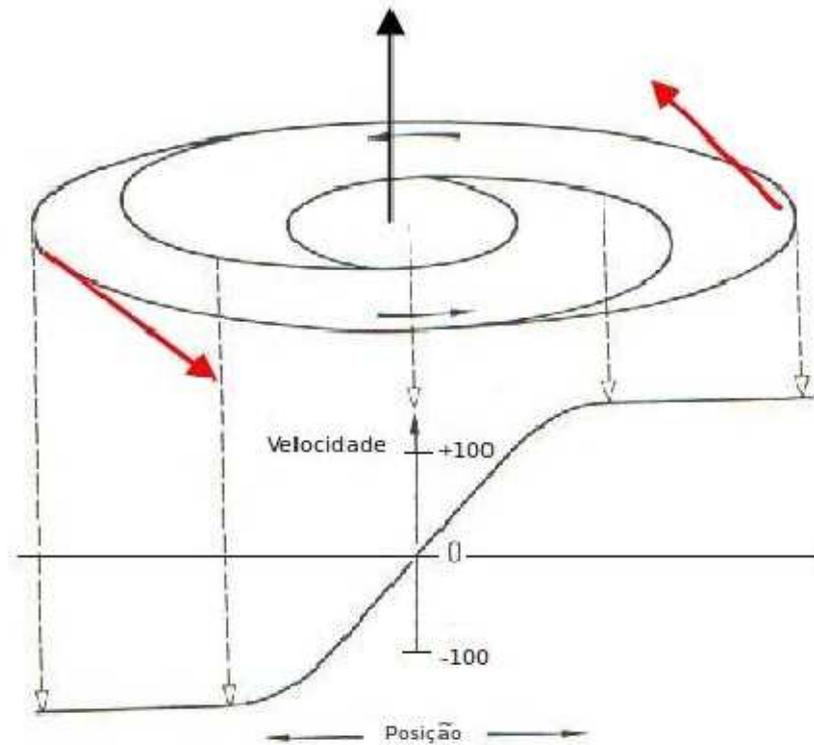


Figura 3.1: Figura esquemática da curva de rotação de uma galáxia espiral.

Andrômeda, demonstram que galáxias deste tipo possuem rotação .

Em galáxias espirais, nas quais o movimento circular das estrelas no disco é dominante sobre o movimento desordenado das estrelas do bojo, pode ser determinada a curva de rotação, que é um gráfico da velocidade de rotação, $v(r)$, em função da distância ao centro da fenda, $r(kpc)$. A Fig. 3.1 ilustra o disco em rotação de uma galáxia e a curva de rotação observada. A velocidade circular em cada ponto é obtida através da diferença entre a velocidade radial observada neste ponto e a velocidade sistêmica.

As figuras 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 mostram a componente da velocidade circular na direção linha da visada para cada ângulo de posição (*painel inferior*). Também podemos observar nestas figuras o perfil do fluxo da linha $H\alpha$ e do fluxo no contínuo em 5735 \AA (*painel superior*), com o objetivo de ilustrar a correspondência entre a velocidade circular e a região da emissão de gás da galáxia.

3.2.1 Resultados para AM2058A

i) Resultados para o ângulo de posição 42°

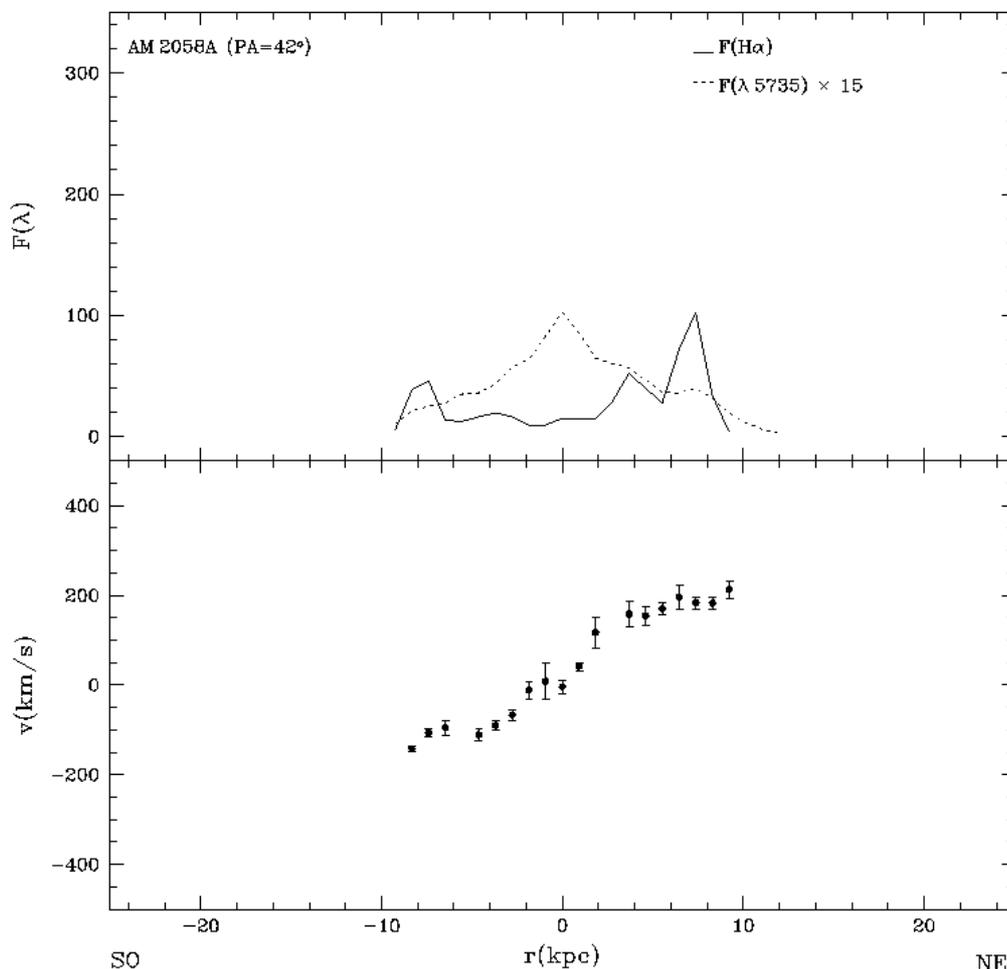


Figura 3.2: Curva de rotação ao longo do $PA=42^\circ$. *Painel superior*: emissão do fluxo em $H\alpha$ (linha contínua) e emissão do fluxo contínua (linha tracejada), ambos em unidades de $10^{-17} \text{ erg cm}^2 \text{ s}^{-1}$. *Painel inferior*: velocidade circular na linha de visada com respeito ao raio da galáxia.

Na Fig. 3.2, podemos ver que a amplitude da velocidade circular observada   da ordem de 200 km s^{-1} , o que indica que este PA está próximo do eixo maior da galáxia. Esta curva de rotação apresenta um comportamento irregular nas regiões externas (que se encontram sobre os braços espirais da galáxia), demonstrando uma diminuição na velocidade de 40 km s^{-1} .

Na emissão do fluxo de $H\alpha$, podemos notar que existe um pico, que pode corresponder a uma região HII muito luminosa não catalogada por Ferreira et al. (2008) (ver Fig. 1.1) localizada no braço espiral na direção SO da galáxia.

ii) Resultados para o ângulo de posição 125°

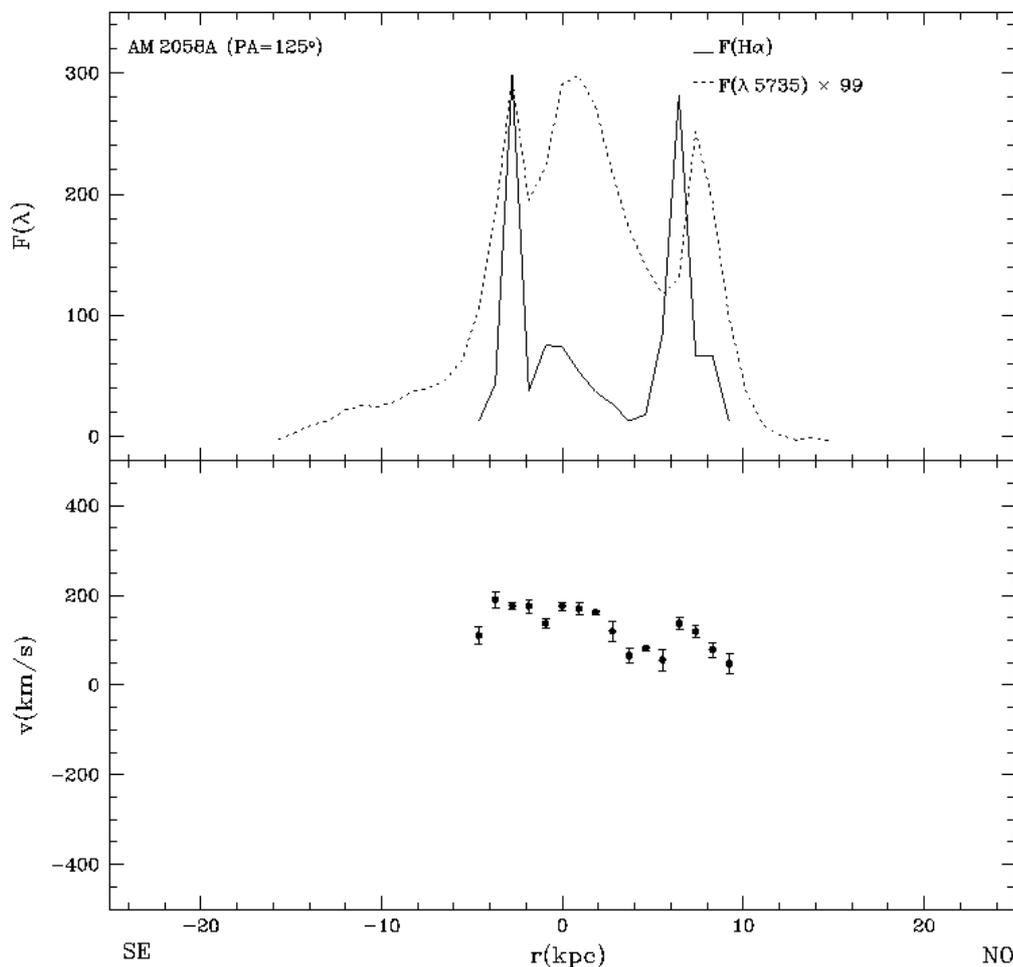


Figura 3.3: Curva de rotação e emissão de fluxo ao longo do PA=125°. Descrição das figuras ver Fig. 3.2

Este ângulo de posição atravessa o disco e os braços espirais da galáxia principal, e podemos ver na Fig. 3.3, através da emissão do fluxo em H α , que existem dois picos de emissão, que correspondem às regiões HII n° 4 e 5. Podemos notar que existe um aumento da velocidade nos pontos da curva de rotação que correspondem a estas regiões HII. A velocidade das regiões 4 e 5 são de 119 ± 13 km/s (7.384 kpc direção NO) e 176 ± 7 km 7.384 kpc direção SE) respectivamente.

iii) Resultados para o ângulo de posição 350°

Esta fenda passa pelo centro da galáxia e próximo do eixo maior. Na Fig. 3.4 podemos ver que esta curva de rotação é simétrica entre 10 kpc N e 10 kpc S. Entretanto, a galáxia apresenta um braço perturbado na direção N, e vemos que os pontos da curva que correspondem a esta região mostram um velocidade circular

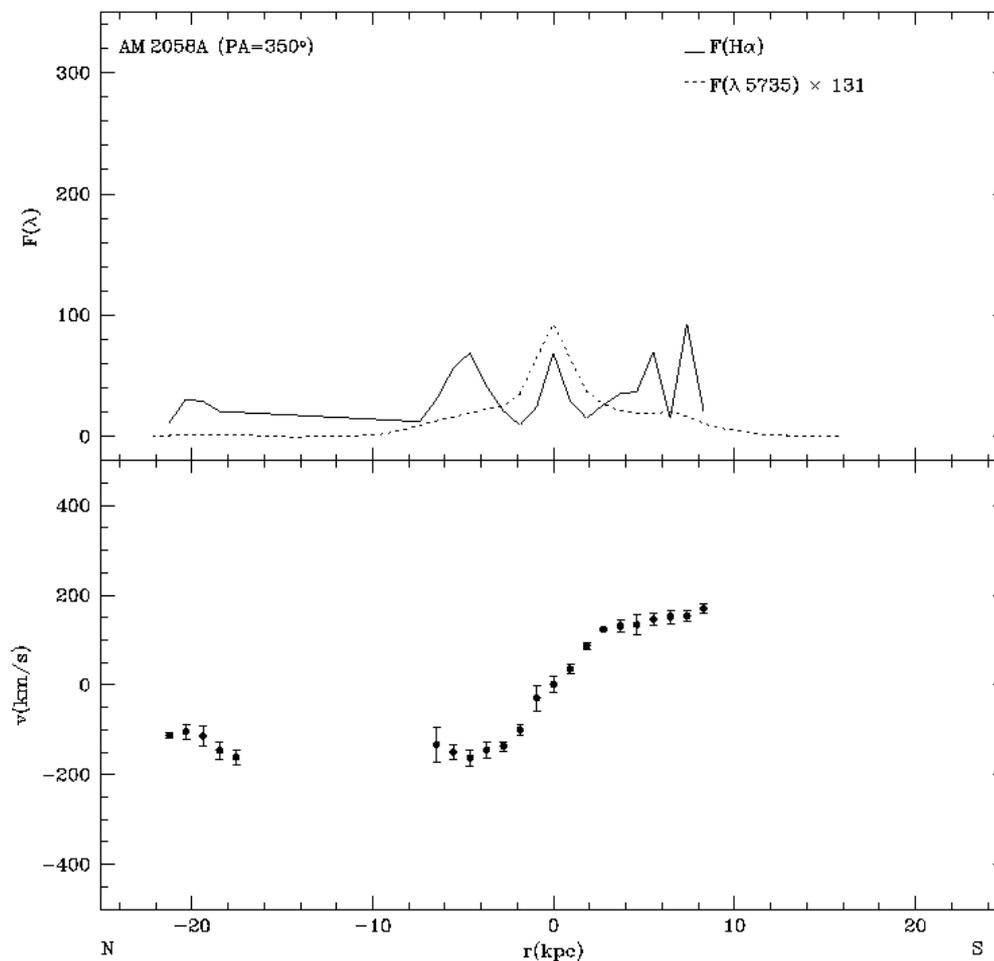


Figura 3.4: Curva de rotação e emissão de fluxo ao longo do PA=350°. Descrição das figuras ver Fig. 3.2

menor que a correspondente ao seu raio. A velocidade do gás que corresponde a este braço parece estar perdendo momento angular com respeito ao do disco.

A deflexão máxima da curva é da ordem de 200 km s^{-1} , e nas últimas aberturas das direções NO e SE nota-se uma diferença na velocidade circular de 40 km s^{-1} , comparada às aberturas adjacentes, estes dois pontos foram medidos sob as regiões HII muito luminosas 10 e 5 (ver Fig. 1.1).

3.2.2 Resultados para AM2058B

i) Resultados para os ângulos de posição 94° e 350°

O campo de velocidade correspondente à galáxia companheira é bastante com-

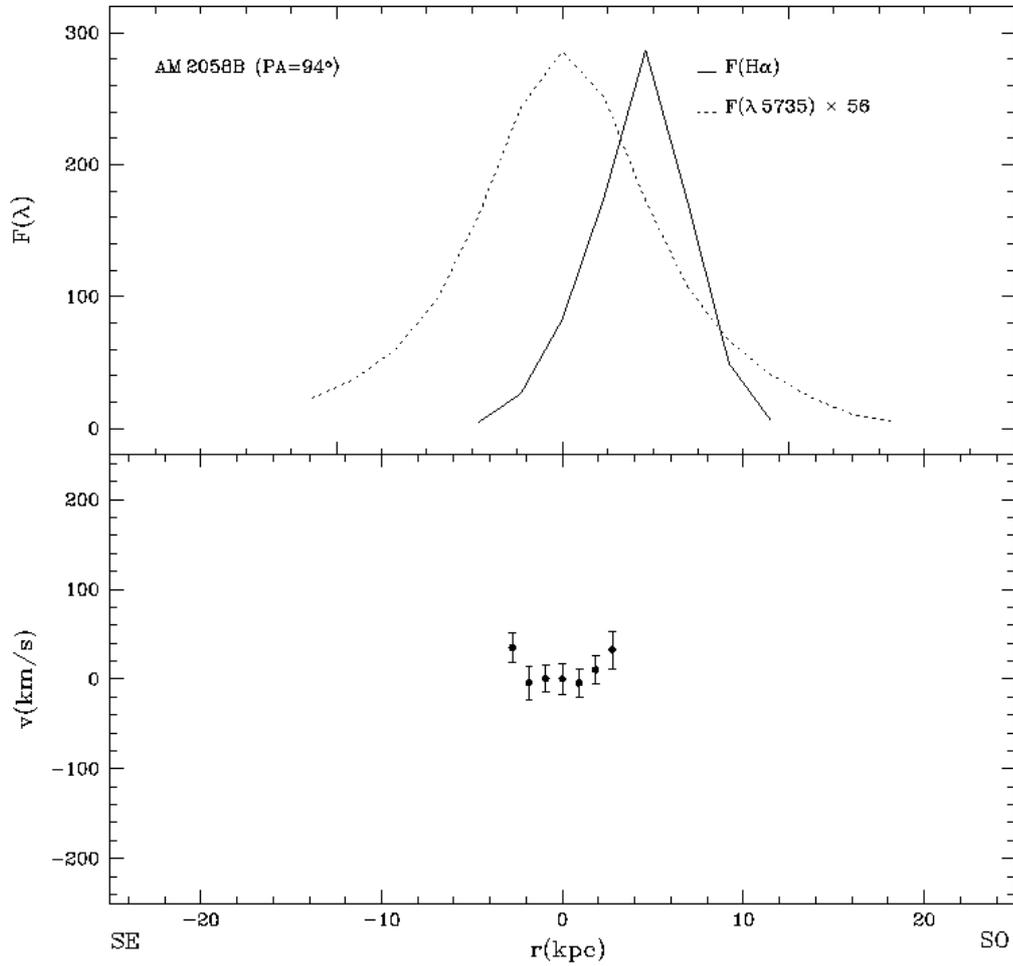


Figura 3.5: Curva de rotação e emissão de fluxo ao longo do PA=94°. Descrição das figuras ver Fig. 3.2

plexo, confirmando que a galáxia é irregular. Podemos ver uma emissão considerável em $H\alpha$ (da ordem da observada para as regiões HII), isto demonstra que a população estelar dominante nesta galáxia é jovem e intermediária.

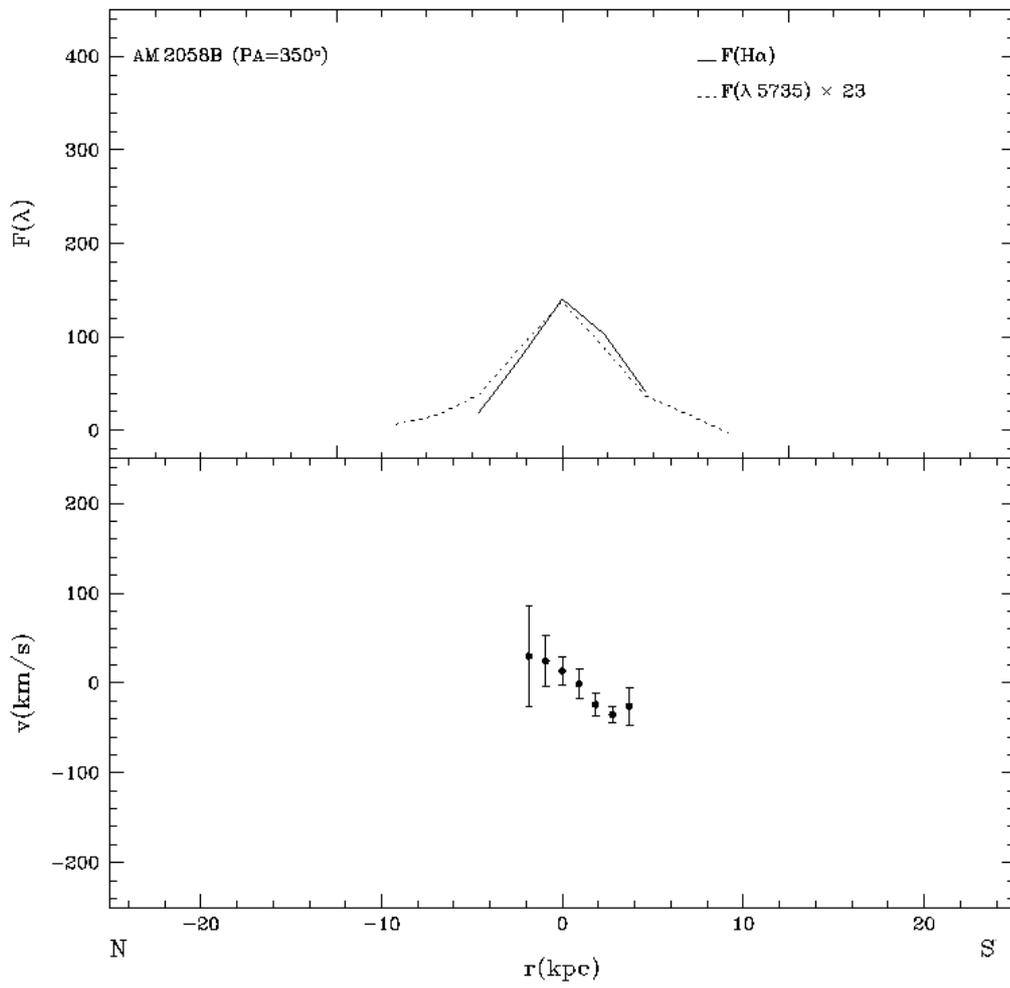


Figura 3.6: Curva de rotação e emissão de fluxo ao longo do $PA=350^\circ$. Descrição das figuras ver Fig. 3.2

Capítulo 4

Modelo para o disco de galáxias espirais

4.1 Potencial logarítmico

As estrelas e o gás se movem nas galáxias devido ao potencial gravitacional gerado pela distribuição de massa. Para as galáxias espirais a distribuição de massa é diferente para o bojo, halo e disco, o que gera um movimento distinto das estrelas e do gás nestas regiões.

A distribuição de massa das estrelas no bojo e halo, como nas galáxias elípticas, é dada por uma distribuição esférica, e as velocidades observadas são uma combinação da velocidade rotacional e da dispersão de velocidades, mostrando movimentos orbitais aleatórios.

No disco das galáxias espirais, as órbitas das estrelas e do gás são quase circulares e esperava-se que a distribuição de matéria seguisse os modelos de massa finita, nos quais a velocidade circular associada ao potencial gerado por esta distribuição de matéria cai de acordo com o modelo Kepleriano (v_c proporcional $r^{-1/2}$ em um r grande). Entretanto, observações indicam que as velocidades se tornam constantes (ou aumentam) a grandes distâncias do centro da galáxias. A explicação para isso é a presença de matéria escura (Rubin & Ford, 1970). Considerando que o movimento circular das estrelas no disco é dominante sobre o movimento desordenado das estrelas do bojo, neste trabalho usaremos a representação da galáxia como um disco achatado, com características semelhantes aos das galáxias espirais.

Para um r grande, $v_c \propto v_0$, e o potencial para este comportamento é logarítmico, ou seja, se mantém constante a partir de um raio limite.

No plano equatorial, o potencial gravitacional para um sistema achatado é dado

por (Binney & Tremaine, 1987):

$$\Phi_L = \frac{1}{2}v_0^2 \ln(r_c^2 + r^2) + const, \quad (4.1)$$

onde r_c e v_0 são constantes.

A velocidade circular para o potencial logarítmico é dada por:

$$v_c^2 = r \frac{d\Phi}{dr}. \quad (4.2)$$

Substituindo a equação 4.1 na equação 4.2 e fazendo a derivada, temos que:

$$v_c = \frac{rv_0}{\sqrt{r^2 + r_c^2}}, \quad (4.3)$$

onde v_0 e r_c são parâmetros que descrevem a amplitude e a forma da curva.

Como a curva de rotação observada (descrita na seção 3.2) está afetada pela inclinação da galáxia, precisamos transformar o sistema de coordenadas no plano para as coordenadas sobre o plano projetado, com o intuito de testar o modelo para o disco de galáxias espirais.

Considerando um raio r de uma galáxia *face-on* (Fig.4.1 a), ao sofrer uma inclinação i , observamos r projetado no plano do céu como r' (Fig.4.1 c). As coordenadas polares no plano da galáxia de um ponto r são dadas por (r, θ) fig. 4.1 b, quando projetadas no céu à um ângulo de inclinação i são alteradas para (r', α) (Fig.4.1 d).

As componentes de r nos eixos x e y são dadas por:

$$r_x = r \sin \theta, \quad (4.4)$$

$$r_y = r \cos \theta. \quad (4.5)$$

A componentes de r' nos eixos x' e y' é dada por:

$$r'_x = r' \sin \alpha, \quad (4.6)$$

$$r'_y = r' \cos \alpha. \quad (4.7)$$

Fazendo a equivalência entre os dois sistemas (r, θ) e (r', α) temos:

$$r_y = r'_y, \quad (4.8)$$

$$r \cos \theta = r' \cos \alpha, \quad (4.9)$$

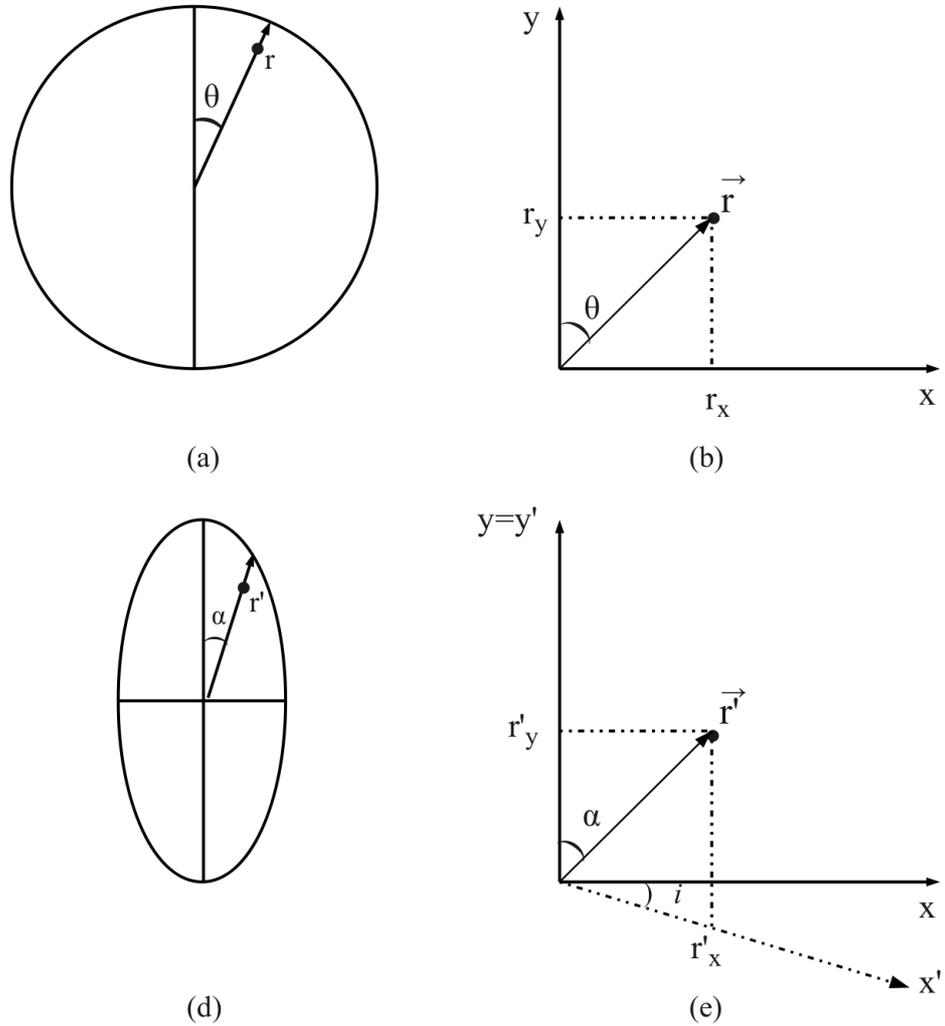


Figura 4.1: (a) Ponto r no plano da galáxia. (b) Ponto r projetado em coordenadas polares nos eixos x e y . (c) Galáxia inclinada projetada no plano do céu, vemos r projetado como r' ; (d) ponto r' projetado em coordenadas polares nos eixos x' e y' .

$$r_x = r'_x, \tag{4.10}$$

$$r \text{ sen} \theta \text{ cos } i = r' \text{ sen} \alpha. \tag{4.11}$$

Podemos encontrar r da seguinte forma:

$$r^2 = r_x^2 + r_y^2, \tag{4.12}$$

e substituindo r_x e r_y na equação anterior, temos:

$$r^2 = \frac{r'^2 \text{sen}^2 \alpha}{\text{sen}^2 \theta \text{cos}^2 i} + r'^2 \text{cos}^2 \alpha, \quad (4.13)$$

$$r^2 = r'^2 \left(\frac{\text{sen}^2 \alpha}{\text{cos}^2 i} + \text{cos}^2 \alpha \right), \quad (4.14)$$

$$r = r' \text{cos} \alpha \sqrt{1 + \frac{\text{tan}^2 \alpha}{\text{cos}^2 i}}. \quad (4.15)$$

A equação 4.15 nos informa a relação entre o r no plano da galáxia, e r' projetado no plano do céu. A relação entre o ângulo θ no disco da galáxia e o ângulo α é dada por:

$$\frac{r_x}{r_y} = \frac{r'_x}{r'_y}, \quad (4.16)$$

$$\frac{r \text{sen} \theta \text{cos} i}{r \text{cos} \theta} = \frac{r' \text{sen} \alpha}{r' \text{cos} \alpha}, \quad (4.17)$$

$$\text{tan} \theta \text{cos} i = \text{tan} \alpha. \quad (4.18)$$

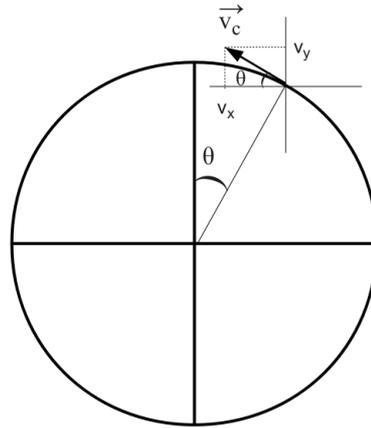


Figura 4.2: Velocidade circular no plano da galáxia decomposta em coordenadas cartesianas.

A velocidade circular no plano da galáxia (Fig.4.2), pode ser decomposta nos

eixos x e y da seguinte forma:

$$v_x = v \cos \theta, \quad (4.19)$$

$$v_y = v \sin \theta. \quad (4.20)$$

Considerando que esta velocidade está projetada no plano do céu, a velocidade na linha de visada é dada por:

$$v_{xobs} = v_c \cos \theta \sin i, \quad (4.21)$$

$$v_{yobs} = v_c \sin \theta. \quad (4.22)$$

A velocidade observada a uma inclinação i é dada pela projeção em x (Eq. 4.21), pois a componente em y é perpendicular à linha de visada, e temos que:

$$v_c = v_{obs} \cos \theta \sin i, \quad (4.23)$$

$$v_c = \frac{v_{obs} \sec \theta}{\sin i}, \quad (4.24)$$

$$v_c = \frac{v_{obs}}{\sin i} \sqrt{(1 + \tan^2 \theta)}. \quad (4.25)$$

Utilizando a Eq. 4.18, temos:

$$v_c = \frac{v_{obs}}{\sin i} \sqrt{1 + \frac{\tan^2 \alpha}{\cos^2 i}}. \quad (4.26)$$

Para um potencial logarítmico, v_c é dada pela Eq. 4.3. Substituindo Eq. 4.26 e Eq. 4.15, na Eq. 4.3, temos que:

$$\frac{v_{obs}}{\sin i} \sqrt{1 + \frac{\tan^2 \alpha}{\cos^2 i}} = \frac{v_0 r' \cos \alpha \sqrt{\cos^2 \alpha + \frac{\sin^2 \alpha}{\cos^2 i}}}{\sqrt{r'^2 (1 + \sin^2 \alpha + \tan^2 i) + r_c^2}}, \quad (4.27)$$

$$\frac{v_{obs}}{\sin i} \sqrt{1 + \frac{\tan^2 \alpha}{\cos^2 i}} = \frac{v_0 r' \cos \alpha \sqrt{\cos^2 \alpha + \frac{\sin^2 \alpha}{\cos^2 i}}}{\sqrt{\frac{r'^2}{\cos^2} (\cos^2 i + \sin^2 \alpha + \sin^2 i) + r_c^2}}, \quad (4.28)$$

$$\frac{v_{obs}}{\sin i} \sqrt{1 + \frac{\sin^2 \alpha}{\cos^2 \alpha \cos^2 i}} = \frac{v_0 r' \cos \alpha \cos i \sqrt{\cos^2 \alpha + \frac{\sin^2 \alpha}{\cos^2 i}}}{\sqrt{\frac{r'^2}{\cos^2} (\cos^2 i + \sin^2 \alpha + \sin^2 i) + r_c^2}}, \quad (4.29)$$

$$v_{obs} = \frac{v_0 r' \cos \alpha \cos i \sin i}{\sqrt{r'^2 (\sin^2 \alpha + \cos^2 i \cos^2 \alpha) + r_c^2 \cos^2 i}}. \quad (4.30)$$

Finalmente, a velocidade circular observada no plano do céu é dada por:

$$v_c(r, \theta) = v_{sist} + \frac{v_0 r' \cos \alpha \cos i \sin i}{\sqrt{r'^2 (\sin^2 \alpha + \cos^2 i \cos^2 \alpha) + r_c^2 \cos^2 i}}, \quad (4.31)$$

onde, i é o ângulo de inclinação da galáxia com respeito à linha de visada, α que é o ângulo medido entre a linha dos nodos (intersecção do plano da galáxia com o plano do céu) e a posição da fenda, v_{sist} é a velocidade sistêmica, v_0 é a velocidade circular máxima e r_c é o raio que corresponde a esta velocidade. Esta equação foi também obtida por Bertola et al. (1991) para descrever a velocidade circular no plano do céu.

4.2 Ajuste do modelo

A velocidade circular observada, é a componente da velocidade circular na linha de visada mais a velocidade sistêmica. Porém, a galáxia está inclinada em um ângulo i com respeito à linha de visada, e a fenda do espectrógrafo forma um ângulo α com a linha dos nodos. A velocidade circular da galáxia sem os efeitos da inclinação pode ser obtida através do ajuste do modelo do disco de galáxias espirais, assumindo que o gás se move sob ação de uma potencial logarítmico. Para isto, fizemos um ajuste utilizando a equação 4.31.

Fizemos um ajuste de mínimos quadrados não-linear para dois ângulos de posição separadamente, (PA=42° e PA=350°), pois estas posições da fenda passam mais próximo do eixo maior da galáxia principal (ver Fig. 2.1). O ajuste foi feito com três parâmetros livres v_0 , α e r_c , considerando o desvio padrão das velocidades.

Tabela 4.1: Parâmetros encontrados através do ajuste.

Galaxy	AM2058A (PA=42°)	AM2058A (PA=350°)
v_0 (km s ⁻¹)	326 ± 27	314 ± 13
r_c (arcsec)	9 ± 2	5 ± 0.5
α (o)	25.22	302
CC	0.9919	0.9973
RMS	1.279	0.789

O melhor ajuste é aquele que fornece um conjunto de parâmetros que minimiza o RMS e corresponde a um coeficiente de correlação (CC) satisfatório. Os valores encontrados estão na Tab.4.1.

Podemos ver na figura 4.3 que, para PA=42°, a curva de rotação apresenta desvios com respeito ao ajuste, principalmente nas duas aberturas que apresentam

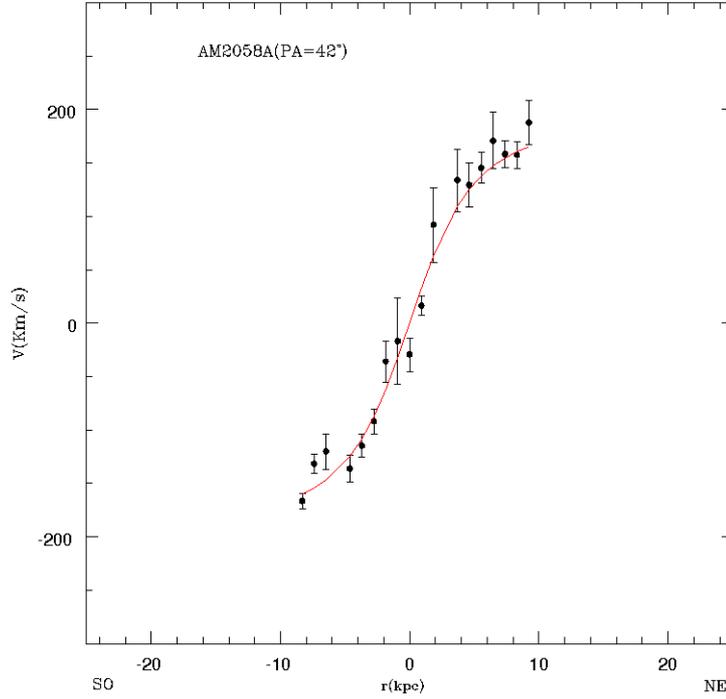


Figura 4.3: Ajuste para curva de rotação da galáxia AM2058A (PA=42°): plot do ajuste (linha vermelha) e curva de rotação (pontos).

um desvio de 30 km s^{-1} , e correspondem aos braços espirais da galáxia.

Para PA=350°, fizemos o ajuste desconsiderando as velocidades que se referem ao braço espiral (direção N), pois nesta região as velocidades apresentam um decréscimo muito acentuado, dificultando a convergência dos valores do ajuste. Fizemos uma extrapolação para esta região para ilustrar o decréscimo das velocidades quando comparados aos valores do ajuste. Podemos ver na Fig.4.4, que a curva de rotação foi bem representada pelo ajuste. Porém, a partir de $r=10 \text{ kpc N}$, três aberturas apresentam desvios consideráveis: as primeiras entre $18 \leq r \leq 23 \text{ kpc N}$ (que correspondem ao braço espiral), apresentam um desvio 80 km s^{-1} com respeito à velocidade estimada pelo ajuste nesta região, e a abertura que corresponde a $r=8.176 \text{ kpc N}$, apresenta uma velocidade desacoplada do resto do disco, demonstrando desvios da velocidade com relação ao ajuste, e isto pode ser explicado pela presença de uma região HII muito luminosa nesta região, a região $n^\circ 10$. Na abertura $r=8.176 \text{ kpc S}$, existe um aumento na velocidade com respeito ao ajuste, que pode estar relacionado com presença da região HII $n^\circ 5$.

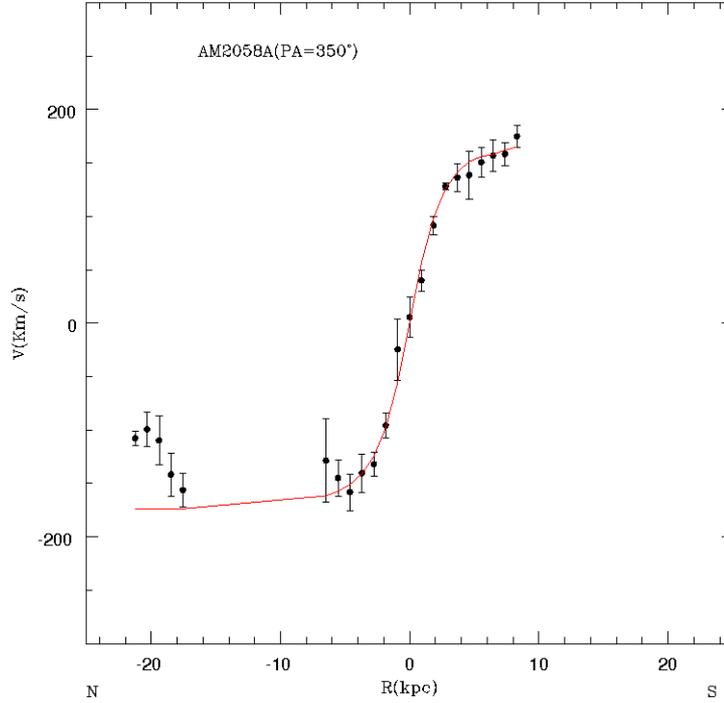


Figura 4.4: Ajuste para curva de rotação da galáxia AM2058A (PA=350°): plot do ajuste (linha vermelha) e curva de rotação (pontos).

4.3 Estimativa de Massa do par

Como estudamos na seção 4.1, as estrelas e o gás se movem nas galáxias devido ao potencial gravitacional gerado pela sua distribuição de massa. Nas galáxias espirais, a maior parte da massa da galáxia está no bojo, portanto o movimento rotacional das estrelas no disco é determinado pela massa do bojo. Determinamos $\mathcal{M}(r)$ do balanço entre a força gravitacional da distribuição de massa central da galáxia (distante r do centro) e a força centrípeta:

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv_0^2(r)}{r}, \quad (4.32)$$

$$\mathcal{M}_{din} = \frac{v^2(r)r}{G}, \quad (4.33)$$

onde v_0 é a velocidade circular máxima da galáxia. A massa estimada utilizando a Eq. 4.33 é chamada massa dinâmica, e representa o limite inferior de massa da galáxia.

4.3.1 Determinação de Massa para AM2058A

Podemos estimar a massa dinâmica da AM2058A através da eq. 4.33, onde temos que:

- $r = 9.7kpc = 2.9 \times 10^{20}m$, é o raio aproximado da galáxia AM2058A;
- $v_0 = 314kms^{-1}$ é a velocidade circular máxima da galáxia encontrada através do ajuste;
- $G = 6.67 \times 10^{-11}m^3kg^{-1}s^{-2}$ é a constante gravitacional;
- $1 pc = 3.0856 \times 10^{16}m$;
- $\mathcal{M}_\odot = 1.9891 \times 10^{30}kg$.

$$\mathcal{M}_{din}(r) = 2.1 \times 10^{11}\mathcal{M}_\odot. \quad (4.34)$$

Podemos estimar a luminosidade das galáxias do par utilizando parâmetros fotométricos obtidos por Ferreira & Pastoriza (2004) listados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros fotométricos obtidos para o par AM2058-381 (Ferreiro & Pastoriza, 2004).

Galáxia	$M_B(mag)$	(B-V)	E(B-V)
A	-21.38	0.6	0.05
B	-20.07	0.4	0.05

Para a AM2058A, a magnitude visual absoluta utilizando os valores da tabela 4.2:

$$M_B - M_V = (B - V) - E(B - V), \quad (4.35)$$

$$-21.38 - M_V = 0.6 - 0.055,$$

$$M_V = -21.925. \quad (4.36)$$

A luminosidade da AM2058A é dada por:

$$\frac{L}{L_\odot} = 10^{-0.4(M_V - M_{V\odot})}, \quad (4.37)$$

$$\frac{L}{L_\odot} = 10^{-0.4(-21.925 - 4.72)}, \quad (4.38)$$

$$L = 4.5 \times 10^{10}L_\odot. \quad (4.39)$$

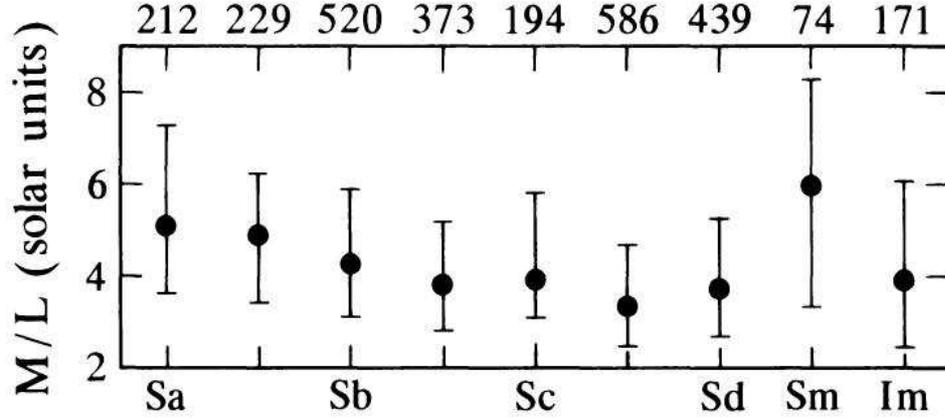


Figura 4.5: Razão massa luminosidade como função do tipo de Hubble (Roberts & Haynes, 1994).

Podemos estimar a relação massa luminosidade para a AM2058A utilizando a massa dinâmica e a luminosidade:

$$\left(\frac{\mathcal{M}_{din}}{L}\right)_A = \frac{2.1 \times 10^{11} \mathcal{M}_\odot}{4.5 \times 10^{10} L_\odot} = 4.6. \quad (4.40)$$

Estudos realizados por Roberts & Haynes (1994) correlacionam a razão massa luminosidade com o tipo de Hubble, esta correlação é apresentada na Fig.4.5.

Segundo estes estudos, o valor de $(\mathcal{M}/L)_A$ está de acordo com uma galáxia espiral.

4.3.2 Determinação de massa para AM2058B

A massa dinâmica para AM2058B não pôde ser determinada utilizando a equação 4.33, pois não foi possível determinar v_0 para esta galáxia. Por este motivo, utilizamos a relação \mathcal{M}/L para estimar sua massa. Como feito para AM2058A, podemos encontrar a luminosidade para AM2058B, utilizando os parâmetros fotométricos (listados na Tab. 4.2), da seguinte forma:

$$M_B - M_V = (B - V) - E(B - V), \quad (4.41)$$

$$-20.07 - M_V = 0.4 - 0.055, \quad (4.42)$$

$$M_V = -20.415, \quad (4.43)$$

$$\frac{L}{L_\odot} = 10^{-0.4(-20.415-4.72)}, \quad (4.44)$$

$$L = 1.1 \times 10^{10} L_{\odot}. \quad (4.45)$$

Fatores como campo de velocidades irregular (ver seção 3.2) e população estelar que vai de idade jovem à intermediária (ver seção 5.1.3) indicam que a galáxia AM2058B tem morfologia irregular. Segundo o estudo feito por Roberts & Haynes (1994)(Fig. 4.5), a relação massa luminosidade das galáxias irregulares está entre $2.4 \leq \mathcal{M}/L \leq 6$. Utilizando uma relação massa luminosidade $(\frac{\mathcal{M}}{L})_B \sim 4.2$, que representa um valor intermediário, temos então:

$$\frac{\mathcal{M}}{L} = 4.2 \frac{\mathcal{M}_{\odot}}{L_{\odot}}, \quad (4.46)$$

$$\mathcal{M} = 4.6 \times 10^{10} \mathcal{M}_{\odot}. \quad (4.47)$$

A razão entre as massas das galáxias do par é igual a $\frac{\mathcal{M}_B}{\mathcal{M}_A} = 0.21$. Isto confirma que o par é um *minor merger*.

Capítulo 5

A população estelar do par AM2058-381

Como discutimos na seção 1.2, os eventos de interação entre galáxias deixam assinaturas na distribuição de idade e metalicidade. Portanto, um estudo detalhado da população estelar em galáxias interagentes é uma fonte importante de informação, não somente sobre a distribuição de idade e metalicidade das componentes de suas populações estelares, mas também para entender vários aspectos relacionados ao processo de interação, e como estes efeitos afetam as propriedades individuais e a evolução (química e física) das galáxias.

Neste capítulo faremos um estudo da idade e metalicidade da população estelar (histórico de formação estelar, ou seja, t e Z) do par em interação AM2058-381. Nas seções seguintes descreveremos os procedimentos necessários para desenvolver este estudo, e faremos uma análise dos resultados obtidos.

5.1 Síntese de população estelar

5.1.1 Método utilizado

Para descrever a distribuição de idade e metalicidade das populações estelares das galáxias do par AM2058-381, utilizamos o código STARLIGHT (Cid Fernandes et al., 2004, 2005, Mateus et al., 2006, Asari et al., 2007, Cid Fernandes et al., 2009). Este código tenta reproduzir o espectro observado, O_λ , utilizando uma combinação de N_\star elementos de uma base de populações estelares simples (SSP¹). O espectro sintético (M_λ) é contruído de acordo com a seguinte equação (Cid Fernandes et al.,

¹Do inglês *Simple Stellar Population*.

2005):

$$M_\lambda = M_{\lambda_0} \left(\sum_{j=1}^{N_\star} x_j b_{j,\lambda} r_\lambda \right) \otimes G(v_\star, \sigma_\star), \quad (5.1)$$

onde:

- M_λ é o fluxo do espectro sintético.
- λ_0 é o ponto de normalização.
- M_{λ_0} é o fluxo sintético em λ_0 .
- $b_{j,\lambda}$ é o espectro da j -ésima ($j=1\dots N_\star$) componente da base, normalizado em λ_0 .
- $r_\lambda \equiv 10^{-0.4(A_\lambda - A_{\lambda_0})}$ é o termo que leva em conta os efeitos de extinção por poeira.
- x_j é o vetor de população estelar e representa a fração com que cada elemento $b_{j,\lambda}$ contribui para o fluxo M_λ .
- $G(v_\star, \sigma_\star)$ é uma distribuição gaussiana de velocidades utilizada para modelar a cinemática estelar na linha de visada, centrada em uma velocidade v_\star e com uma dispersão σ_\star .
- \otimes é o operador de convolução.

Cada componente x_j ($j=1, \dots, N_\star$) representa a fração de contribuição da SSP com idade t_j e metalicidade Z_j para o fluxo em λ_0 .

O melhor ajuste é aquele que minimiza o χ^2 entre o espectro observado e o sintético, ou seja:

$$\chi^2 = \sum_{\lambda} [(O_\lambda - M_\lambda) w_\lambda]^2, \quad (5.2)$$

onde $w_\lambda = e^{-1/\lambda}$, é o inverso do erro em cada λ . Regiões em torno de linhas de emissão, pixels ruins ou linhas do céu não são consideradas no ajuste fazendo $w_\lambda = 0$. A análise quantitativa é dada pelo χ_λ^2 e pelo *adev* (Cid Fernandes et al., 2004), onde χ_λ^2 , é o χ^2 dividido pelo número de λ 's utilizados no ajuste, e o *adev* é o desvio percentual médio $\frac{|O_\lambda - M_\lambda|}{O_\lambda}$ sobre todos os pixels ajustados.

Para maiores detalhes consulte o manual disponível em <http://www.starlight.ufsc.br>.

5.1.2 A escolha da base

Neste trabalho utilizamos como base SSPs teóricos extraídos dos modelos evolucionários de população estelar de Bruzual & Charlot (2003), os quais são baseados na biblioteca STELIB (Le Borgne et al., 2003), que é composta por espectros estelares observados de alta resolução espectral. Utilizamos os modelos evolucionários de Padova (1994), com função de massa de Salpeter (1955), como recomendados por Bruzual & Charlot (2003).

Para construir uma base que reproduza bem os espectros das galáxias do par, é necessário levar em conta os efeitos da interação entre as galáxias, como formação estelar recente e decréscimo da metalicidade. Para isso, utilizamos 48 SSPs com idades $t = 0.001, 0.009, 0.01, 0.04, 0.1, 0.28, 0.64, 0.90, 1.43, 2.50, 5.0$ e 13 G_{anos} e metalicidades de $Z/Z_{\odot} = 0.02, 0.2, 1$ e 2.5 .

5.2 Resultados da síntese de população estelar

Realizamos para o par AM2058A a síntese de população estelar para cada espectro unidimensional na faixa de 3700 à 6900 \AA extraídos ao longo da fenda para os diferentes ângulos de posição das galáxias do par AM2058-381 (ver Fig. 2.1). Utilizamos a lei de avermelhamento de Cardelli et al. (1989), $R_V = 3.1$ e ponto de normalização de $\lambda_0 = 4750 \text{ \AA}$.

Para descrever a mistura da população estelar, agrupamos as contribuições do vetor de população estelar, x_j , de acordo com a idade das componentes (Cid Fernandes et al., 2005):

- população estelar jovem (x_J): $t_j < 25 \text{ M}_{anos}$;
- população estelar intertermediária (x_I): $100 \text{ M}_{anos} \leq t_j \leq 1.4 \text{ G}_{anos}$;
- população estelar velha (x_V): $t_j > 2.5 \text{ G}_{anos}$.

O mesmo pode ser feito para representar a fração em massa, μ_j , que é calculada utilizando a relação massa luminosidade \mathcal{M}/L dos diferentes SSPs dos espectros da base.

Uma maneira de caracterizar o histórico de formação estelar da galáxia é descrever cada extração unidimensional ao longo da fenda em diferentes ângulos de posição em termos da contribuição da população estelar média (pesada em luz e em massa). Para isso, utilizamos as seguintes equações (Cid Fernandes et al., 2005):

$$\langle \log t_{\star} \rangle_L = \sum_{j=1}^{N_{\star}} x_j \log t_j, \quad (5.3)$$

$$\langle \log t_{\star} \rangle_M = \sum_{j=1}^{N_{\star}} \mu_j \log t_j. \quad (5.4)$$

Nas seções 5.2.1 discutiremos os resultados da síntese de população estelar para cada posição da fenda (ver Fig. 2.1 seção 2.1). Esta análise será feita primeiramente de uma maneira geral, através da variação espacial da população estelar pesada em luz e em massa para cada abertura. Posteriormente, analisaremos a variação espacial da idade média (pesada em luz e em massa), e da extinção da poeira (A_V , na banda V). Na seção 5.2.2 analisaremos o resultado da síntese para as regiões HII (n° 4,5 e 10) e o núcleo da galáxia AM2058A. Na seção 5.2.3 faremos a mesma análise para a galáxia companheira AM2058B.

5.2.1 Resultados da síntese de população estelar para AM2058A

i) Resultados para o ângulo de posição 42°

Os resultados obtidos com a síntese de população estelar para cada abertura ao longo do PA=42° estão listados na Tab. 5.1.

A variação espacial das contribuições, pesadas em luz e em massa, das componentes do vetor de população estelar para este PA estão sumarizadas no painel inferior da Fig. 5.1; as aberturas correspondentes as posições na fenda estão identificadas no histograma por letras. Podemos ver que a contribuição em luz da população estelar de idade intermediária é dominante nas regiões que correspondem aos braços espirais e ao disco da galáxia; porém, nas aberturas mais próximas do núcleo, a população estelar velha é dominante com $x_V = 100\%$. A população estelar jovem tem contribuição máxima de 40% nas aberturas *b* e *q*, que correspondem aos braços espirais SO e NE da galáxia. Já a contribuição pesada em massa, tem população estelar velha dominante ao longo deste PA, exceto nas aberturas *a*, *c*, *p*, *q* e *r*, onde a contribuição da população estelar de idade intermediária torna-se importante. Não detectamos população estelar jovem pesada em massa para este ângulo de posição.

Embora tenhamos analisado todos os espectros unidimensionais, a título de ilustração, discutiremos em detalhes aqui apenas os resultados da síntese para espectros

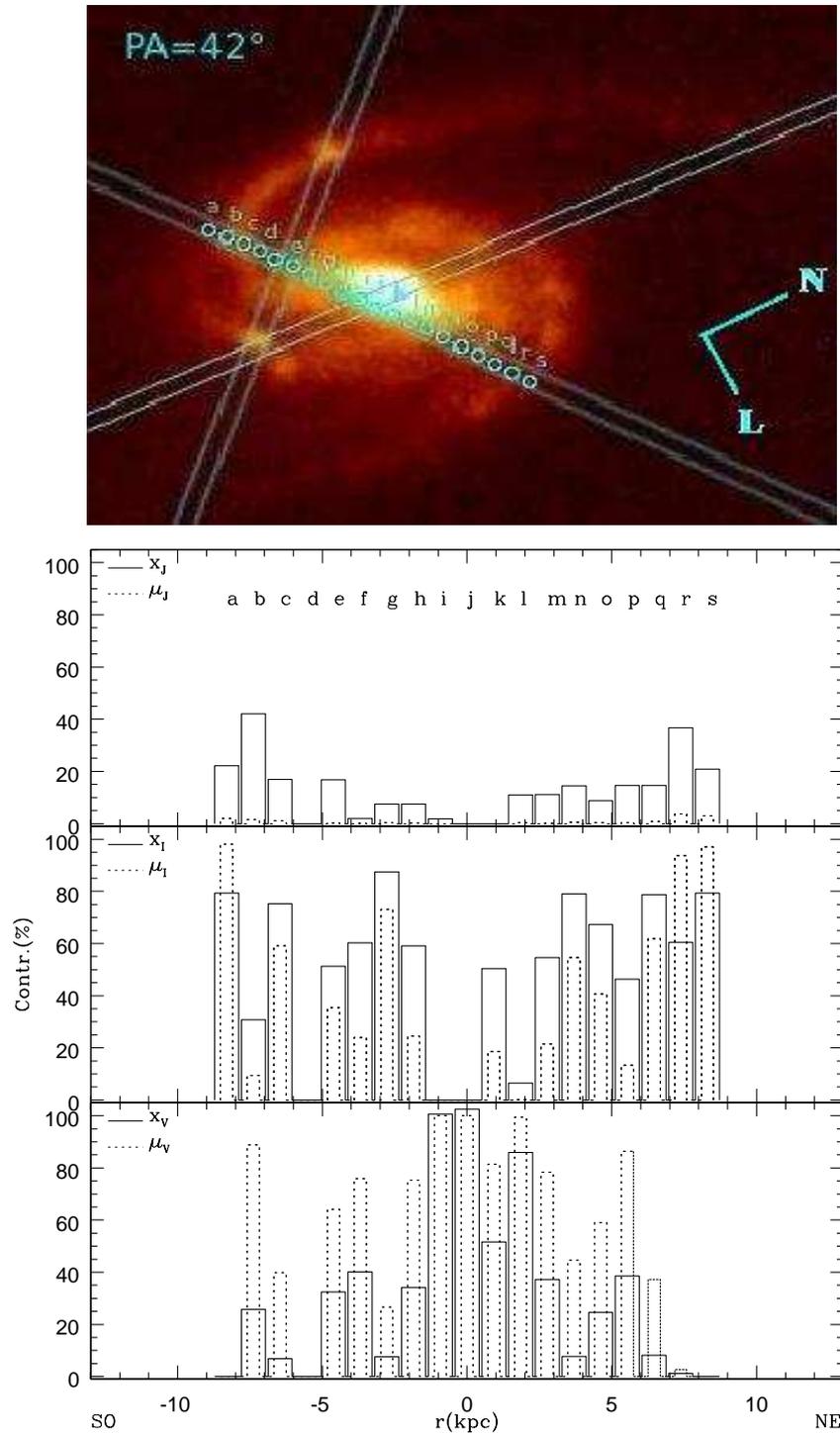


Figura 5.1: Distribuição de idade pesada em luz e em massa para a galáxia AM2058A: PA=42°.

individuais das aberturas a e r , que correspondem aos braços espirais SO e NE, respectivamente. Os demais resultados individuais estão no apêndice A.

A figura 5.2 (Painel superior) apresenta para a abertura a , que corresponde

ao braço espiral SO, o espectro observado (linha preta), com o espectro sintético (linha vermelha) sobreposto. Uma ampliação deste espectro demonstra que o ajuste é satisfatório. No painel inferior, podemos ver que o resíduo da subtração destes espectros oscila em torno de zero. O histograma da figura 5.2 demonstra que a população estelar de idade intermediária é dominante nesta posição, e resulta de uma mistura de metalicidade solar e sobresolar. A contribuição da população estelar jovem é de $x_J=25\%$ com metalicidade subsolar. A figura 5.3 apresenta o resultado da síntese para o braço espiral NE (abertura r). Podemos ver que a população estelar de idade intermediária é dominante com metalicidade sobresolar, o mesmo que acontece na abertura referente ao braço espiral SO. A contribuição da população estelar jovem é de 25%, com metalicidade $Z/Z_\odot=0.2$, semelhante ao que encontramos no braço espiral SO.

Tabela 5.1: Resultados da síntese para AM2058A: PA=42°.

r(kpc)	Id	x_J (%)	x_I (%)	x_V (%)	μ_J (%)	μ_I (%)	μ_V (%)	χ^2	adev	A_V (mag)
-8.307	a	23.8	77.9	0.0	3.0	97.0	0.0	0.6	7.28	0.83
-7.384	b	40.6	34.6	23.5	1.6	13.9	84.5	0.7	6.24	0.88
-6.461	c	17.0	75.5	6.8	1.1	59.6	39.3	0.5	6.03	0.70
-5.538	d	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-4.615	e	18.0	49.8	32.9	0.2	31.0	68.8	1.0	5.25	0.30
-3.692	f	3.4	59.5	39.5	0.1	21.9	78.0	0.9	4.79	0.47
-2.769	g	7.7	79.4	15.6	0.3	54.5	45.2	0.9	4.17	0.57
-1.846	h	9.9	56.9	34.1	0.3	23.3	76.4	0.7	3.83	0.56
-0.923	i	1.6	0.0	100.7	0.0	0.0	100.0	0.7	3.80	0.32
0	j	1.6	0.0	101.1	0.0	0.0	100.0	0.6	4.10	0.77
0.923	k	1.1	58.3	42.6	0.0	22.5	77.5	1.0	4.12	0.60
1.846	l	10.2	14.1	79.2	0.2	3.4	96.4	0.6	4.07	0.39
2.769	m	9.3	54.7	39.1	0.1	20.2	79.7	0.6	4.25	0.33
3.692	n	14.2	76.2	10.8	0.5	50.6	48.9	0.6	3.69	0.59
4.615	o	10.0	68.0	22.7	0.4	49.5	50.1	0.7	4.48	0.34
5.538	p	15.1	50.7	33.8	0.4	17.6	82.1	0.7	5.56	0.53
6.461	q	14.5	78.1	8.9	0.8	59.6	39.6	0.9	4.95	0.34
7.384	r	33.1	62.4	2.7	2.5	84.4	13.1	0.5	5.05	0.29
8.307	s	22.7	69.4	8.4	3.3	77.6	19.1	0.5	5.91	0.00

De uma forma geral, na Fig. 5.4 podemos ver a variação espacial da idade média (massa e luz) e do avermelhamento. Podemos ver que, na região mais próxima ao núcleo, as contribuições em luz e em massa são equivalentes e demonstram um domínio da população estelar velha (90%). Já nas aberturas fora do núcleo, a contribuição pesada em massa continua sendo velha, e a contribuição pesada em luz vai de jovem à intermediária.

A variação no avermelhamento A_V ao longo deste PA é máxima (≥ 7.0 mag) para as posições a , b e i , que correspondem ao braço espiral na direção SO e o

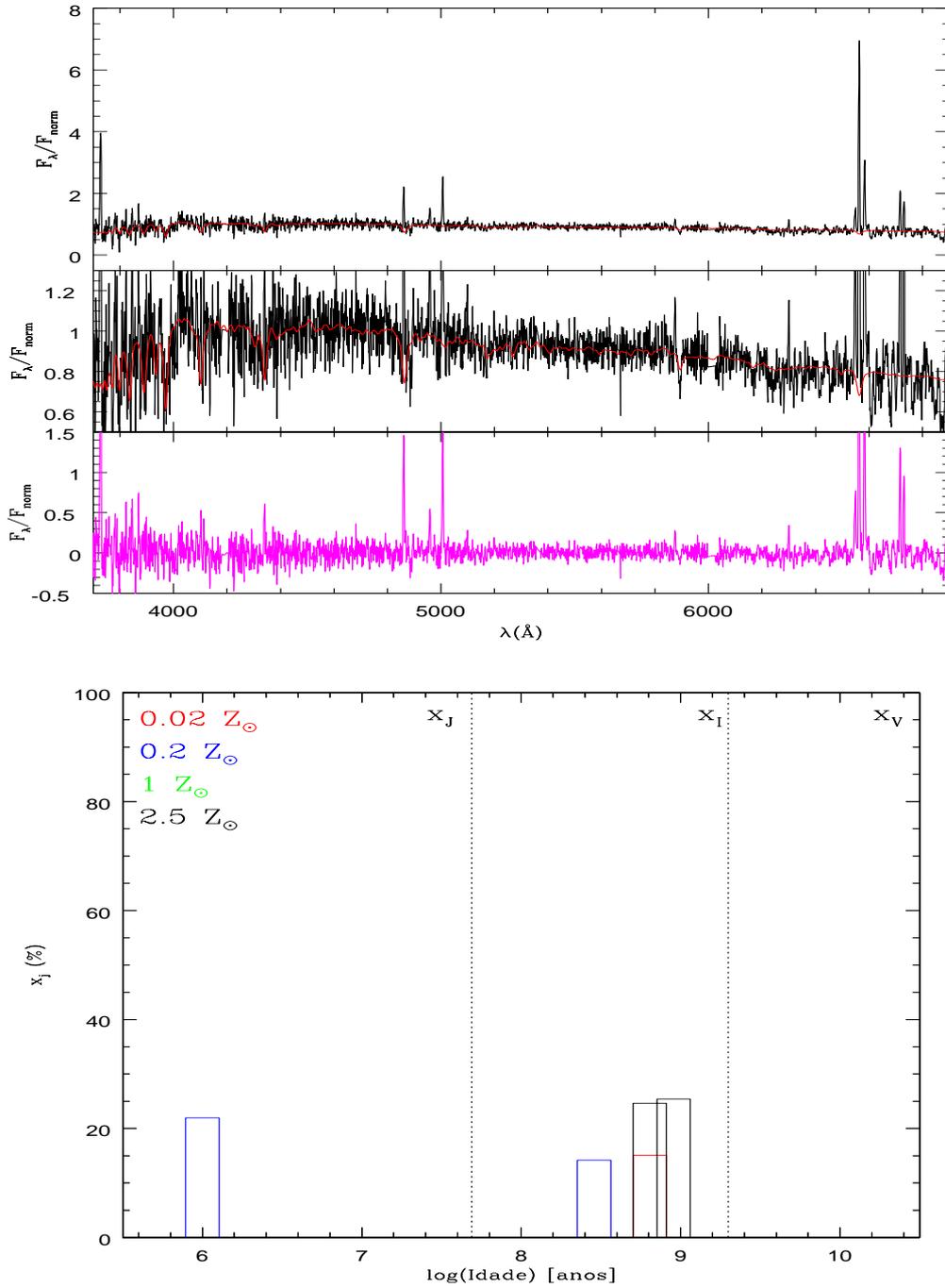


Figura 5.2: Resultado da síntese para a abertura a do $\text{PA}=42^\circ$: *Painel superior*: espectro observado (linha preta) e espectro sintético (linha vermelha) (topo); zoom do espectro observado e do espectro sintético (painel intermediário); (base) espectro observado menos o sintético (rosa). *Painel inferior*: contribuição da idade (log) pesada em luz com diferentes metalicidades, os bins de idade estão separados através da linha tracejada e identificados como x_J , x_I e x_V , respectivamente.

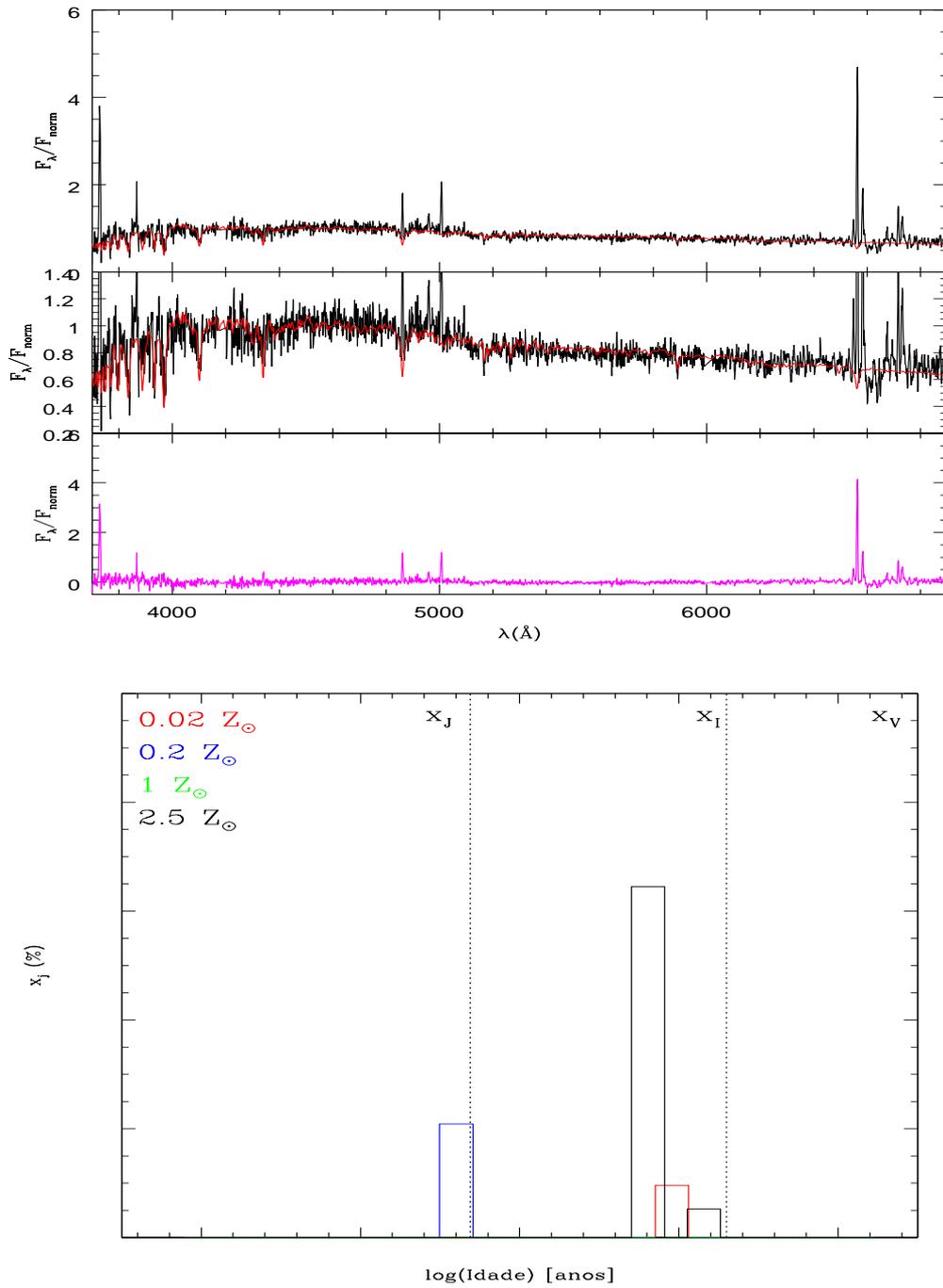


Figura 5.3: Resultado da síntese para a abertura s do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

núcleo da galáxia, respectivamente.

Para este PA, podemos concluir que a população estelar, pesada em luz, observada ao longo da fenda está de acordo com a esperada para uma galáxia espiral: população estelar de idade velha dominante nas regiões nucleares e população estelar

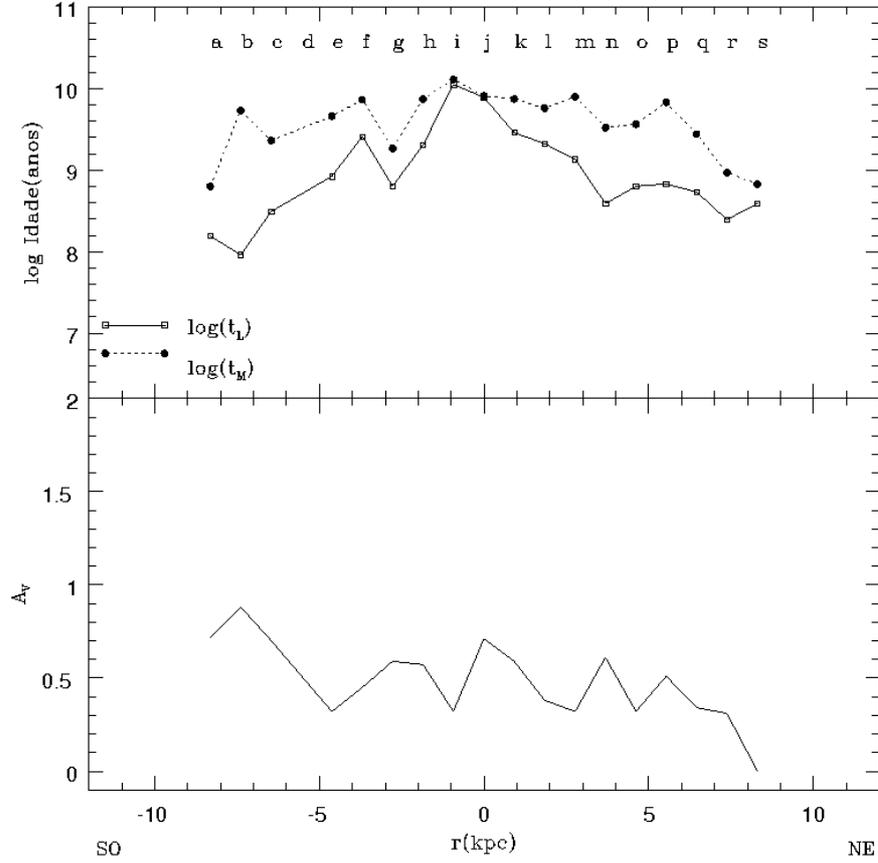


Figura 5.4: Resultados para a contribuição da população estelar média x_j e μ_j , e do A_V ao longo do PA=42°.

de idade intermediária dominante no disco e braços espirais, resultados semelhantes foram encontrados por Krabbe et al. (2008) para uma galáxia de mesmo tipo morfológico.

ii) Resultados para o ângulo de posição PA=125°

Na Tab. 5.2 estão listados os resultados da síntese para este PA.

As contribuições ao longo deste PA, das componentes do vetor de população estelar, pesadas em luz e em massa, são apresentadas na Fig. 5.5. A contribuição da população estelar pesada em luz é dominada por estrelas de idade intermediária nas aberturas $a-h$ e p , e por estrelas jovens nas aberturas m, n e o . A população estelar velha, pesada em luz, tem contribuição máxima de $x_V=40\%$. Já a população estelar pesada em massa tem contribuição dominante velha, exceto para as posições c, g, n, o e p nas quais a idade dominante é intermediária. A população jovem pesada em massa tem contribuição máxima de 30% para este PA.

A fenda neste PA atravessa os braços espirais da galáxia e passa por duas regiões

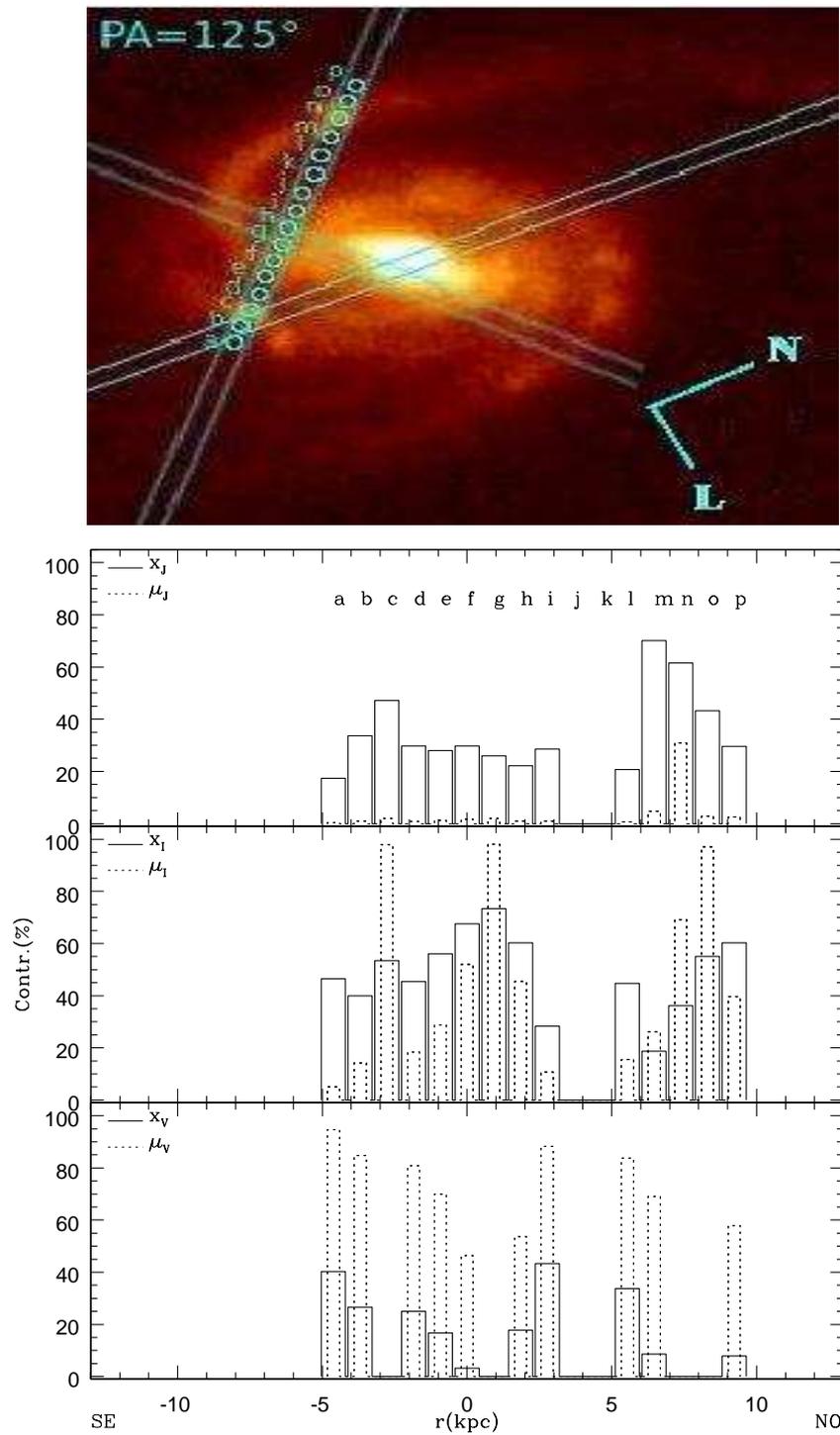


Figura 5.5: Distribuição de idade pesada em luz e em massa para a galáxia AM2058A: PA=125°.

HII muito luminosas, n° 4 (aberturas *m* e *n*) e n° 5 (abertura *c*) (ver seção 1.4). Iremos analisar os resultados para estas regiões individualmente na seção 5.2.2, os demais resultados individuais para esta posição da fenda estão disponíveis no

apêndice B.

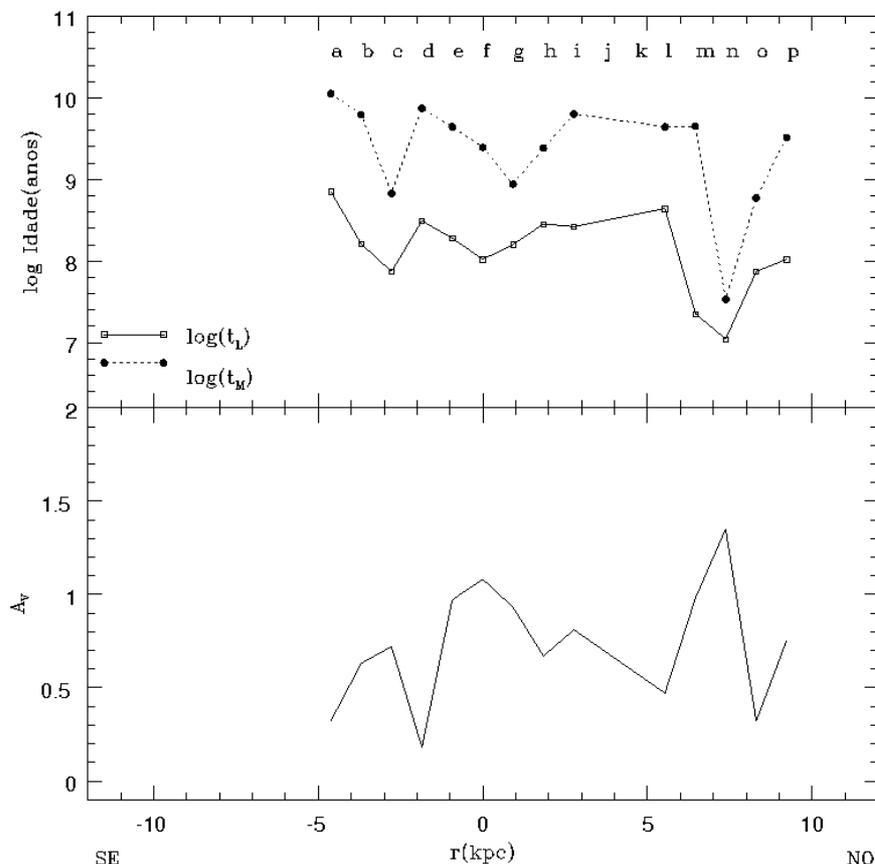


Figura 5.6: Resultados para a contribuição da população estelar média (x_j e μ_j) e A_V ao longo do PA=125°.

Na Fig 5.6, através da idade média do vetor de população estelar pesado em luz e em massa, podemos ver que a contribuição dominante, pesada em massa, é de idade velha, exceto para a abertura n (7 kpc), onde se observa uma contribuição significativa da idade jovem. Já a idade média pesada em luz, apresenta contribuição dominante de estrelas de idade intermediária ao longo deste PA, exceto para região n , onde se observa o domínio da idade jovem. O avermelhamento, ao longo desta posição da fenda é ≤ 1 mag, porém apresenta um pico de $A_V=1.35$ mag na abertura n que corresponde à região HII n° 4.

iii) Resultados para o ângulo de posição 350°.

Os resultados obtidos com a síntese de população estelar para cada abertura ao longo deste PA estão apresentados na Tab. 5.3.

Na Fig. 5.7 estão sumarizadas as contribuições, pesadas em luz e em massa, das componentes do vetor de população estelar para esta posição da fenda. Podemos ver

Tabela 5.2: Resultado da síntese para AM2058A: PA=125°.

r(kpc)	Id	x_J (%)	x_I (%)	x_V (%)	μ_J (%)	μ_I (%)	μ_V (%)	χ^2	adev	A_V (mag)
-4.615	a	19.2	43.7	41.4	0.2	4.6	95.2	0.8	9.65	0.32
-3.692	b	33.8	47.6	19.1	1.0	17.6	81.4	1.0	5.95	0.65
-2.769	c	47.1	53.5	0.0	2.0	98.0	0.0	0.8	4.11	0.72
-1.846	d	29.1	45.0	26.4	0.7	17.6	81.6	0.6	5.18	0.20
-0.923	e	29.1	53.5	18.4	1.0	21.8	77.2	0.7	5.05	0.95
0	f	29.5	67.8	3.2	1.7	52.5	45.8	0.9	3.91	1.06
0.923	g	25.8	73.4	0.0	2.1	97.9	0.0	0.5	3.89	0.95
1.846	h	21.8	61.5	16.9	0.8	37.5	61.7	0.7	4.34	0.69
2.769	i	28.6	30.7	40.8	0.9	12.7	86.4	0.6	5.14	0.81
-	j	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	k	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5.538	l	20.4	44.6	34.2	0.4	8.8	90.8	0.6	8.39	0.45
6.461	m	82.2	0.0	14.7	12.1	0.0	87.9	0.8	8.16	1.18
7.384	n	61.4	36.4	0.0	30.7	69.3	0.0	1.0	4.60	1.35
8.307	o	48.4	49.4	0.0	7.9	92.1	0.0	0.9	4.91	0.54

que, a contribuição em luz da população estelar jovem é dominante nas regiões que correspondem aos braços espirais da galáxia (posições $a-f$ e $m-r$), já nas aberturas mais próximas do núcleo (posições $g-l$), a contribuição da população estelar jovem decai e a população estelar de idade velha se torna dominante, a população estelar jovem pesada em luz tem contribuição máxima de $x_J=40\%$. A contribuição da população estelar pesada em massa apresenta idade velha dominante ao longo de toda a fenda.

A fenda neste PA atravessa o núcleo da galáxia e duas regiões HII (10 e 5) muito luminosas listadas na seção 1.4, que discutiremos na seção 5.2.2. Os demais resultados individuais para este PA estão no apêndice C.

Na Fig. 5.8 podemos ver que a contribuição dominante da população estelar média, pesada em massa, é velha ao longo deste PA, já a população estelar média pesada em luz varia de acordo com a região da galáxia, sendo velha nas regiões centrais da galáxia e jovem nas regiões externas. O A_V varia em torno de 1 mag ao longo desta PA, porém na posição m , tem um pico de $A_V=1.25$ mag.

De maneira geral, nas posições centrais correspondentes ao núcleo da galáxia, a população estelar velha é dominante. Já nas posições externas que correspondem aos braços espirais da galáxia, podemos ver que a contribuição dominante é da população estelar de idade jovem.

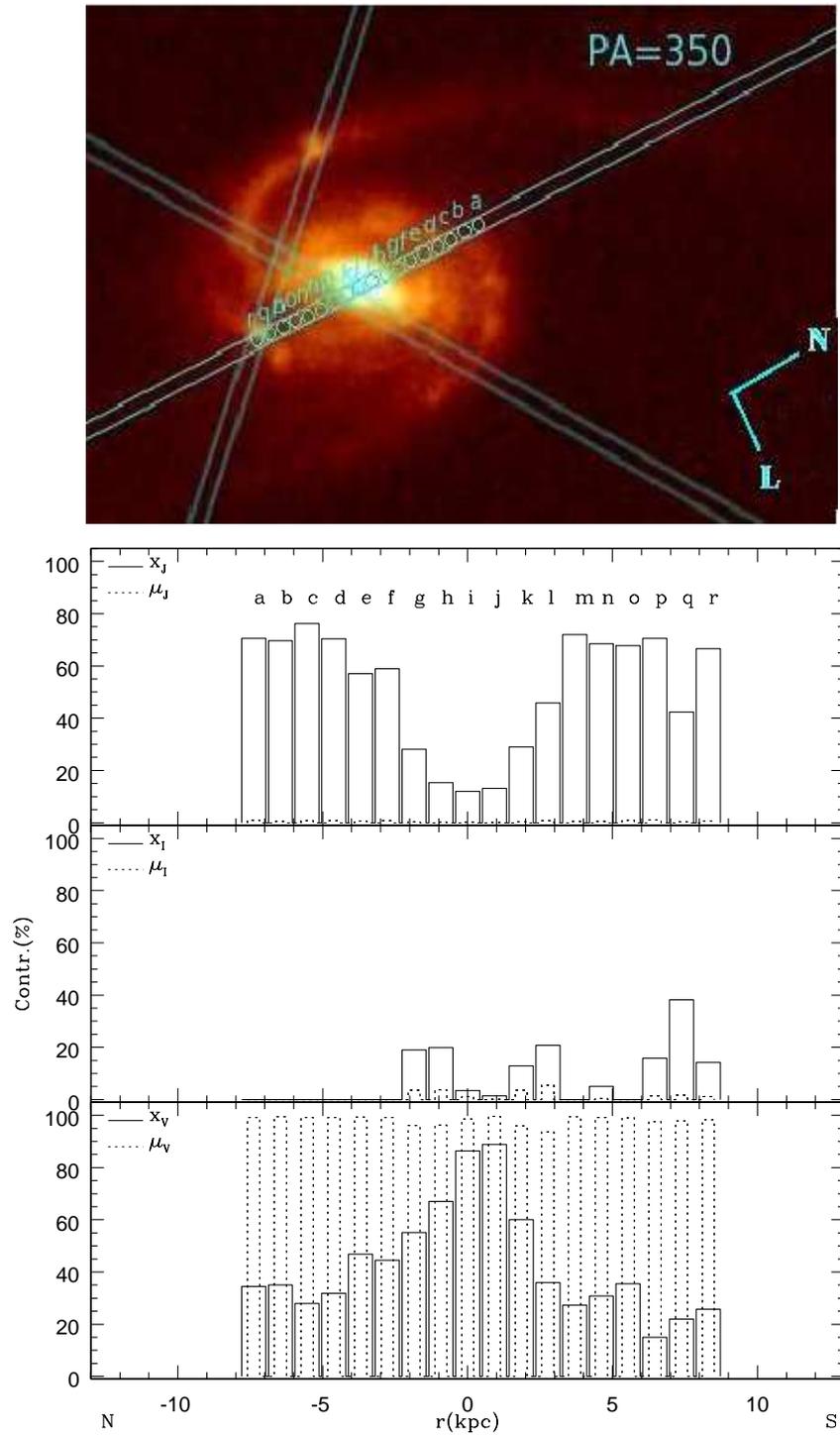


Figura 5.7: Distribuição de idade pesada em luz e em massa para a galáxia AM2058A: $PA=350^\circ$.

5.2.2 Resultado da síntese para o núcleo e regiões HII da galáxia AM2058A

Nesta seção iremos analisar individualmente o resultado da síntese para a região nuclear e para as regiões HII n° 4, 5 e 10 da galáxia principal AM2058A.

Tabela 5.3: Resultados da síntese para AM2058A: PA=350°.

r(kpc)	Id	x_J (%)	x_I (%)	x_V (%)	μ_J (%)	μ_I (%)	μ_V (%)	χ^2	adev	A_V (mag)
-7.384	a	70.6	0.0	34.5	0.9	0.0	99.1	0.7	12.88	0.00
-6.461	b	67.9	3.7	33.3	0.5	0.4	99.1	1.2	10.27	0.31
-5.538	c	74.9	0.0	29.2	0.6	0.0	99.4	1.2	8.86	0.78
-4.615	d	70.6	0.0	31.7	0.7	0.0	99.3	1.1	7.55	1.05
-3.692	e	57.2	0.0	46.6	0.7	0.0	99.3	0.8	6.77	0.75
-2.769	f	59.2	0.0	44.3	0.7	0.0	99.3	0.7	5.56	1.10
-1.846	g	27.7	17.1	57.4	0.3	3.2	96.5	0.9	4.88	0.70
-0.923	h	15.2	19.6	67.4	0.2	3.6	96.2	1.1	3.33	0.64
0	i	12.1	4.1	85.5	0.2	1.5	98.3	0.8	2.85	0.87
0.923	j	13.2	1.8	88.5	0.1	0.3	99.6	0.8	3.43	0.57
1.846	k	28.0	9.8	64.1	0.4	2.9	96.7	0.9	4.55	0.54
2.769	l	46.5	21.0	35.0	0.8	5.8	93.4	1.0	5.94	0.98
3.692	m	71.6	0.0	27.8	0.5	0.0	99.5	0.9	7.00	1.25
4.615	n	70.2	6.1	28.4	0.6	0.5	98.9	1.1	7.53	0.95
5.538	o	69.5	0.0	33.7	0.9	0.0	99.1	1.1	8.00	0.69
6.461	p	62.2	15.9	23.1	1.0	1.1	97.9	1.3	6.76	0.70
7.384	q	41.6	38.3	22.7	0.3	1.7	97.9	0.9	8.51	0.46
8.307	r	67.5	12.4	26.4	0.7	1.0	98.4	1.1	12.62	0.59

i) Núcleo

O espectro da região nuclear (Fig.5.9) mostra linhas de absorção H e K do CaII, NaI, banda G e as linhas do Mg, identificadas na Fig. 2.7. O espectro sintético ajustou bem estas linhas de absorção. O histograma mostra que no núcleo da galáxia a contribuição da população estelar velha com metalicidade solar é dominante. As estrelas jovens de 1 milhão de anos e baixa metalicidade ($Z/Z_{\odot}=0.02$), contribuem com 15% em luz, elas são a fonte de ionização do gás, onde se originam as linhas de emissão.

ii) Regiões HII

Na seção 1.4 estão listadas as 11 regiões HII mais luminosas catalogadas para a galáxia AM2058A por Ferreira et al. (2008). As fendas em diferentes ângulos de posição passam por três destas regiões: n° 4, 5 e 10, e o resultado da síntese para estas regiões será discutido individualmente.

A região HII n° 10 (abertura d) está localizada próximo ao braço N, que fica à 4.6 kpc do centro da galáxia. A fenda (PA=350°) passa pela parte externa desta região. Na Fig. 5.10, podemos ver que a população estelar jovem é dominante (70%) e a metalicidade é subsolar. Nesta região existiram dois surtos de formação estelar, um à 5.01 M_{anos} e outro à 10 M_{anos} com a mesma metalicidade ($Z/Z_{\odot}=0.02$). Existe uma contribuição de 31% de população estelar velha composta de dois surtos de formação estelar, um com metalicidade solar e outro com metalicidade sobresolar, esta contribuição da população estelar velha pode ser resultado da proximidade desta

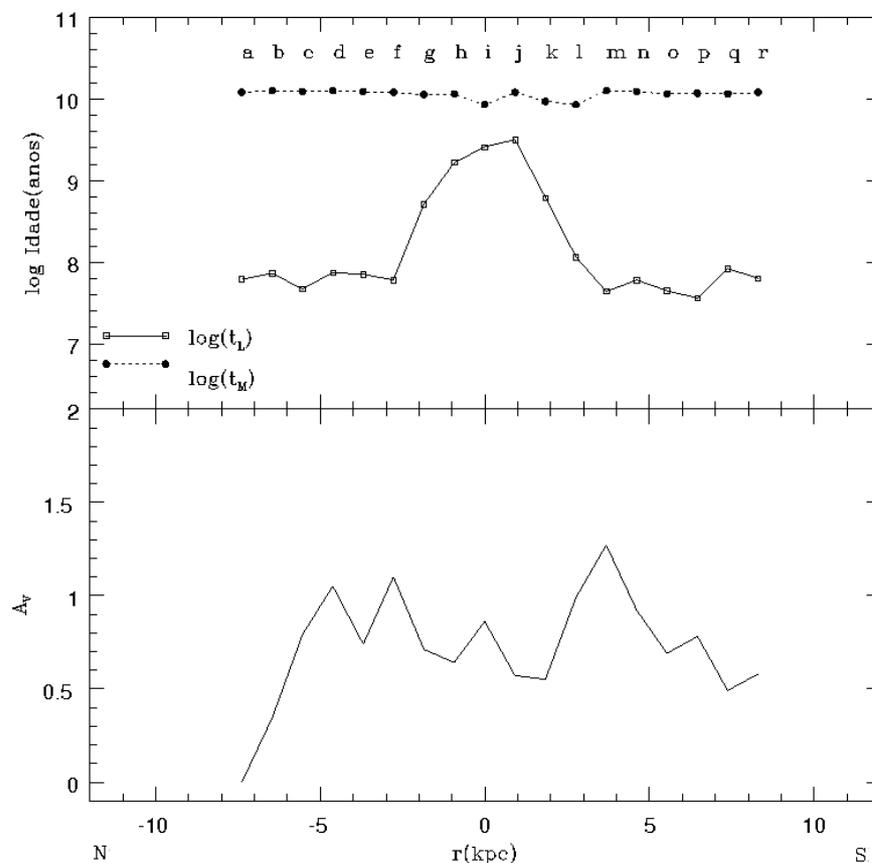


Figura 5.8: Resultados para a contribuição da idade média das componentes do vetor de população estelar x_j e μ_j e A_V ao longo do PA=350°.

região com o bojo da galáxia. Ferreira et al. (2008) encontram uma luminosidade $L(H\alpha)=6.64 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ e estimaram a idade de $3.6 M_{\text{anos}}$, o que está de acordo com a idade do último evento de formação estelar que observamos para esta região. A taxa de formação estelar de $4.2 \times 10^{-2} \mathcal{M}_{\odot}/\text{ano}$.

A região HII n°4 (abertura n) está localizada no braço espiral NO, e a fenda (PA=125°) passou pelo centro desta região. A Fig. 5.11 (painel inferior) mostra que ocorreram dois surtos de formação estelar, um há $1 M_{\text{anos}}$ (27%) e outro há $5 M_{\text{anos}}$ (30%) com metalicidade subsolar ($Z/Z_{\odot}=0.2$) e solar, respectivamente. Portanto, a população estelar jovem é dominante nesta região. Ferreira et al. (2008) encontraram que ela apresenta luminosidade $L(H\alpha)=1.96 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$, idade de $6.2 M_{\text{anos}}$ e taxa de formação estelar de $1.1 \times 10^{-2} \mathcal{M}_{\odot}/\text{ano}$. A idade encontrada por Ferreira et al. (2008) para esta região não está de acordo com a encontrada para este trabalho.

Finalmente, na Fig. 5.12 apresentamos o resultado da síntese para a região HII

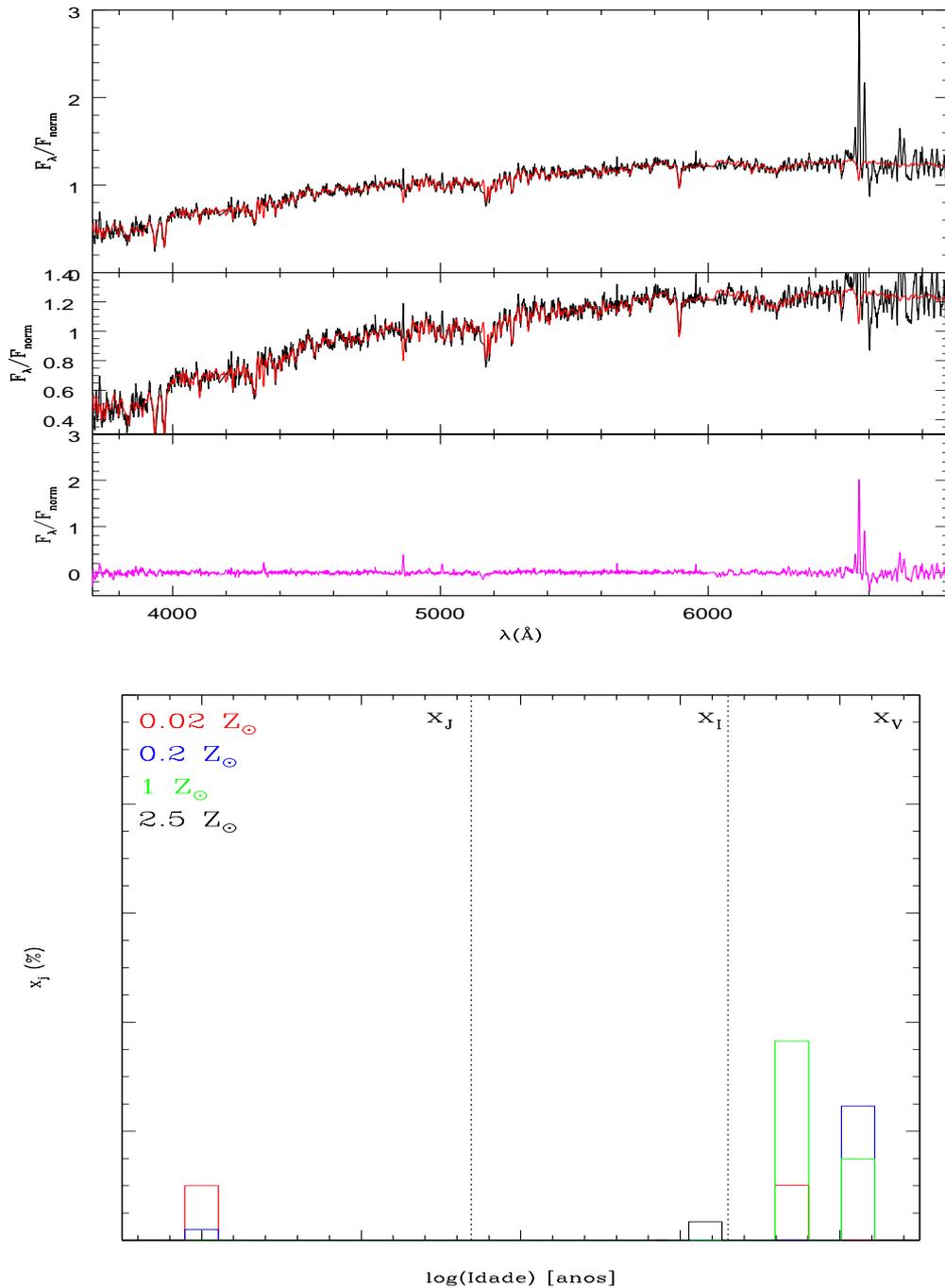


Figura 5.9: Resultado da síntese para o núcleo da AM2058A (PA=350°): descrição das figuras ver Fig. 5.2

n° 5 (abertura c), que está localizada no braço espiral SE. Este resultado indica que a população estelar dominante é de idade intermediária (53%) com contribuição de metalicidade subsolar (29%) e sobresolar (24%). Nesta região ocorreu outro surto de formação estelar à $5 M_{\text{anos}}$ com a contribuição de 47% e metalicidade solar. Para esta

região, Ferreiro et al. (2008) encontraram que a luminosidade é $L(H\alpha)=1.80 \times 10^{39}$ erg s⁻¹, a idade de 6.3 M_{anos} e a taxa de formação estelar é de $7.1 \times 10^{-2} \mathcal{M}_{\odot}/ano$. Neste caso, a idade encontrada por Ferreiro et al. (2008) para esta região está de acordo com o resultado encontrado para este trabalho.

Podemos ver que as três regiões HII das quais temos informações espectrais apresentam contribuição da população estelar jovem com metalicidade solar e subsolar, e que as idades estimadas através da fotometria integrada por Ferreiro et al. (2008) para estas regiões estão de acordo com as encontradas pela síntese. Nas regiões HII n° 4 e 5 podemos ver que existe um surto de formação estelar em 5 M_{anos} . O último evento de formação estelar foi há 1 M_{anos} .

5.2.3 Resultados da síntese de população estelar para AM2058B

i) Resultados da síntese para o ângulo de posição 94°

Na Tabela 5.4 estão listados os resultados da síntese para a fenda no PA=94°. Da mesma maneira que fizemos para AM2058A, na Fig. 5.13 (painel inferior) podemos ver a variação espacial das contribuições (pesadas em luz e em massa) das componentes do vetor de população estelar para este PA. As aberturas correspondentes as posições no histograma estão identificadas por letras, conforme feito para as PAs da galáxia AM2058A. A distribuição de idades, pesada em luz, obedece um gradiente que começa com o domínio da população estelar de idade intermediária (direção SE) e decresce até que na última abertura (direção SO) a população estelar jovem se torna dominante com 60% de contribuição. Em massa, a contribuição do vetor de população estelar é dominante de idade intermediária ao longo da fenda. Na Fig. 5.14, a idade média pesada em luz confirma este gradiente de idades e mostra que ele está acompanhado pelo aumento do A_V ao longo da fenda. O A_V apresenta contribuição máxima (1.67 mag) para a abertura que tem maior contribuição (60%) de idade jovem.

Através do resultado individual da síntese para cada abertura, podemos ver a contribuição pesada em luz das idades para diferentes metalicidades. A componente de idade intermediária dominante tem metalicidade $Z/Z_{\odot}=0.02$ até a abertura central da galáxia, onde a metalicidade $Z/Z_{\odot}=0.2$ se torna dominante. A título de ilustração nas figuras 5.15 e 5.16 demonstram estas diferentes contribuições, os demais resultados individuais estão no apêndice D. A Fig. 5.17 representa a abertura h onde existe maior contribuição de população estelar jovem (60%) com metalicidade $Z/Z_{\odot}=0.2$ dominante, o evento de formação estelar nesta região ocorreu à 5 M_{anos} , o mesmo encontrado para as regiões HII n° 4 e 5 da galáxia AM2058A. Os demais

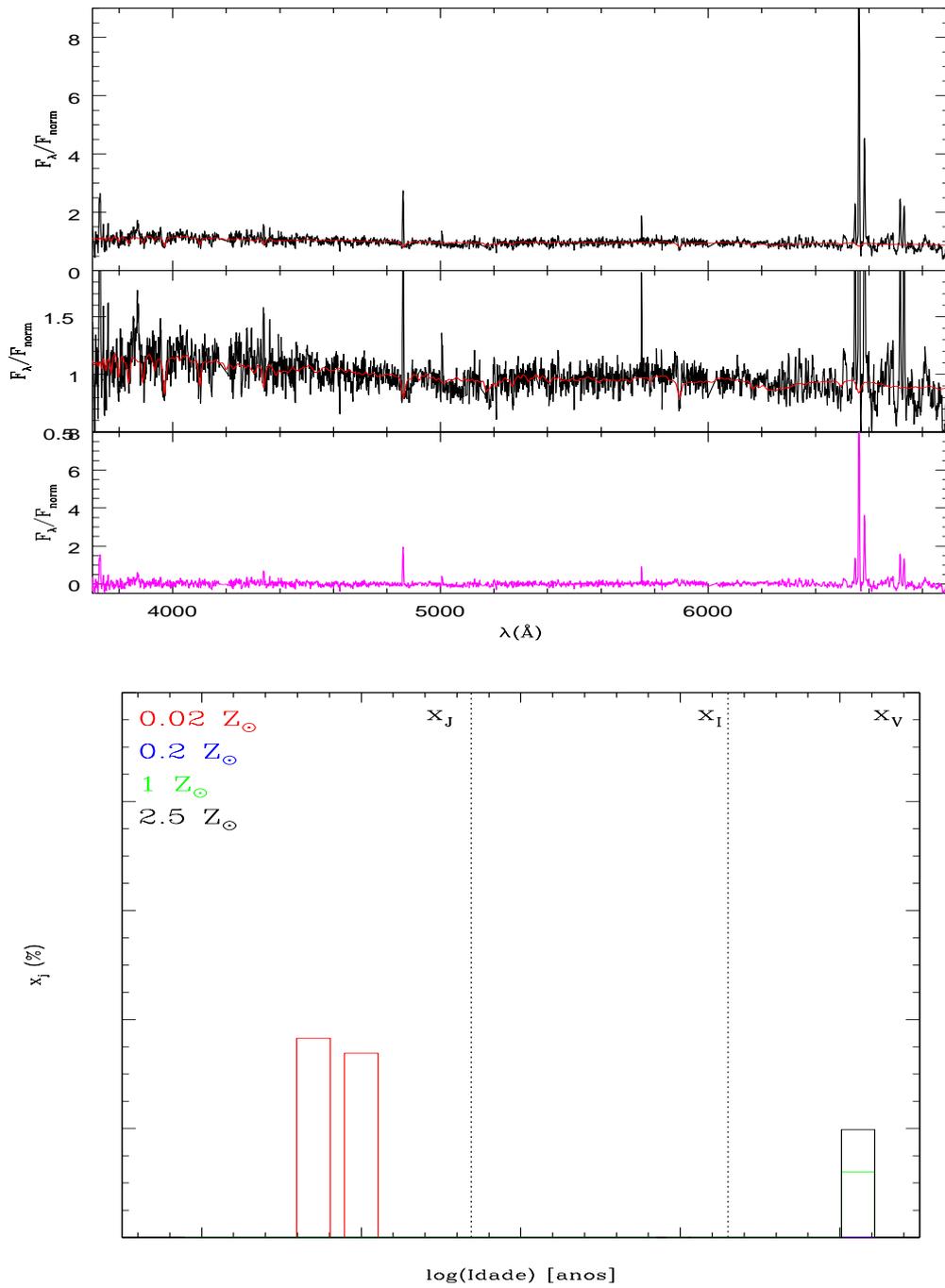


Figura 5.10: Resultado da síntese para a posição d do PA=350° que corresponde a região HII n° 10 : Descrição das figuras ver Fig. 5.2

resultados individuais para esta posição da fenda estão no apêndice D.

A distribuição de idades da população estelar, pesada em luz, desta galáxia está de acordo com o seu tipo morfológico (irregular), e vai de jovem à intermediária.

ii) Resultados da síntese para o ângulo de posição 350°

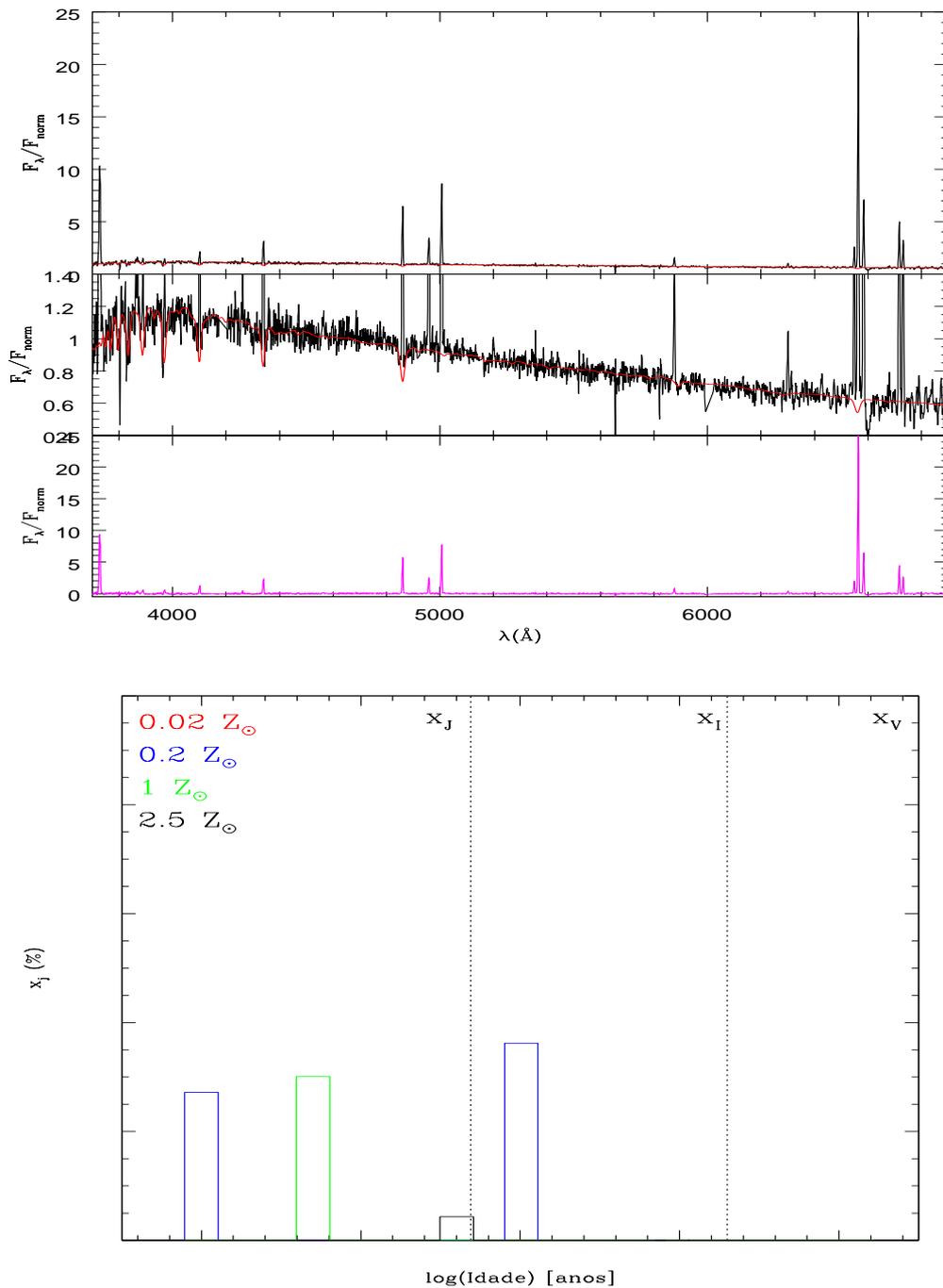


Figura 5.11: Resultado da síntese para a posição n do $\text{PA}=125^\circ$ que corresponde a região HII n $^\circ$ 4 : Descrição das figuras ver Fig. 5.2

Os resultados da síntese para este PA estão listados na Tab. 5.5. A variação espacial das componentes do vetor de população estelar (luz e massa), podem ser acompanhadas no histograma da Fig. 5.18. A população estelar, pesada em luz e em massa, tem contribuição dominante de idade intermediária ao longo da fenda

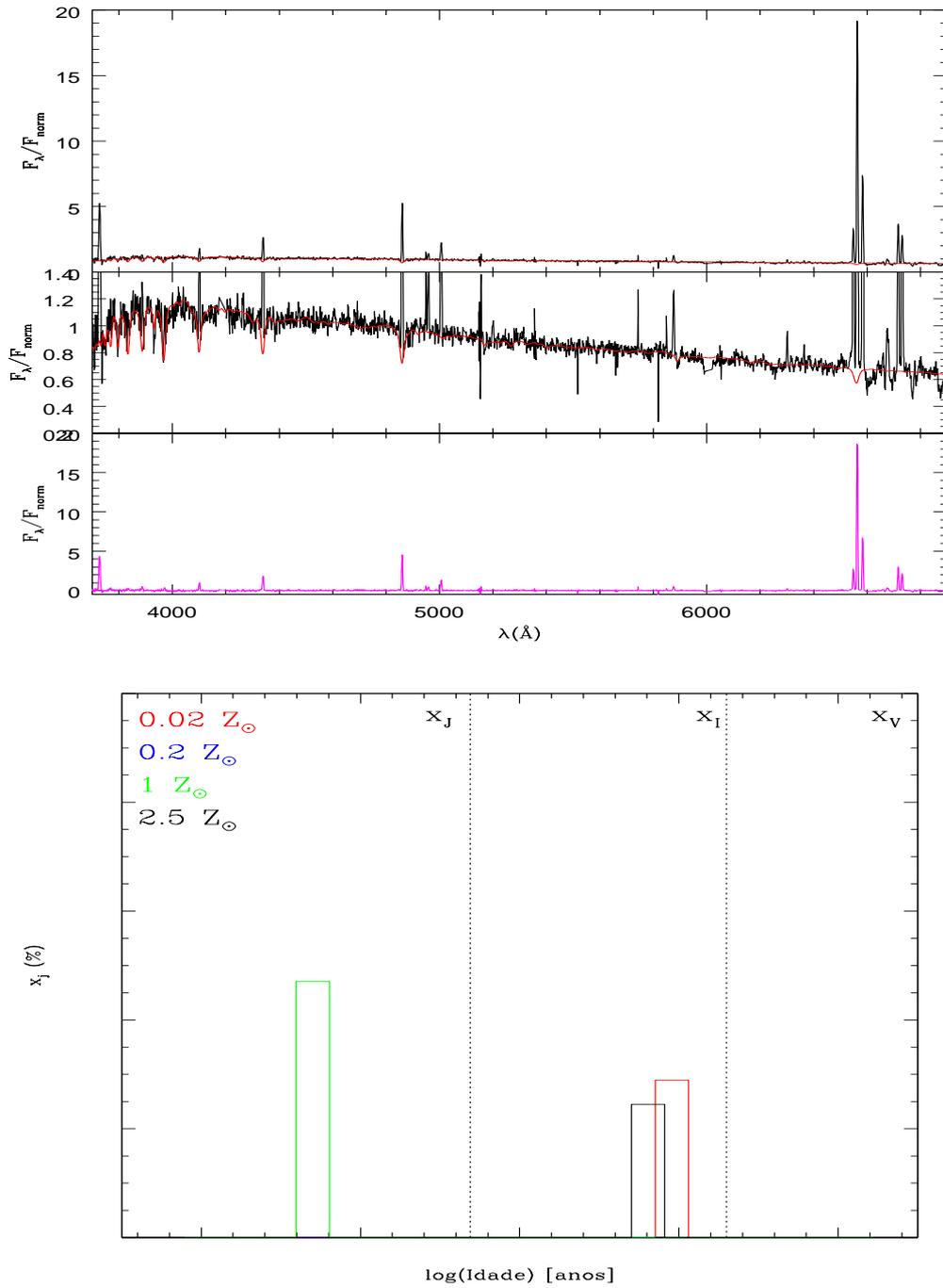


Figura 5.12: Resultado da síntese para a posição c do $\text{PA}=125^\circ$ que corresponde a região HII n° 5 : Descrição das figuras ver Fig. 5.2

neste PA, o que está de acordo com a população estelar encontrada para o $\text{PA}=94^\circ$ nesta mesma região.

Na Fig. 5.20, são apresentados os resultados das contribuições da idade média da população estelar e do avermelhamento. Podemos ver que, as contribuições da idade

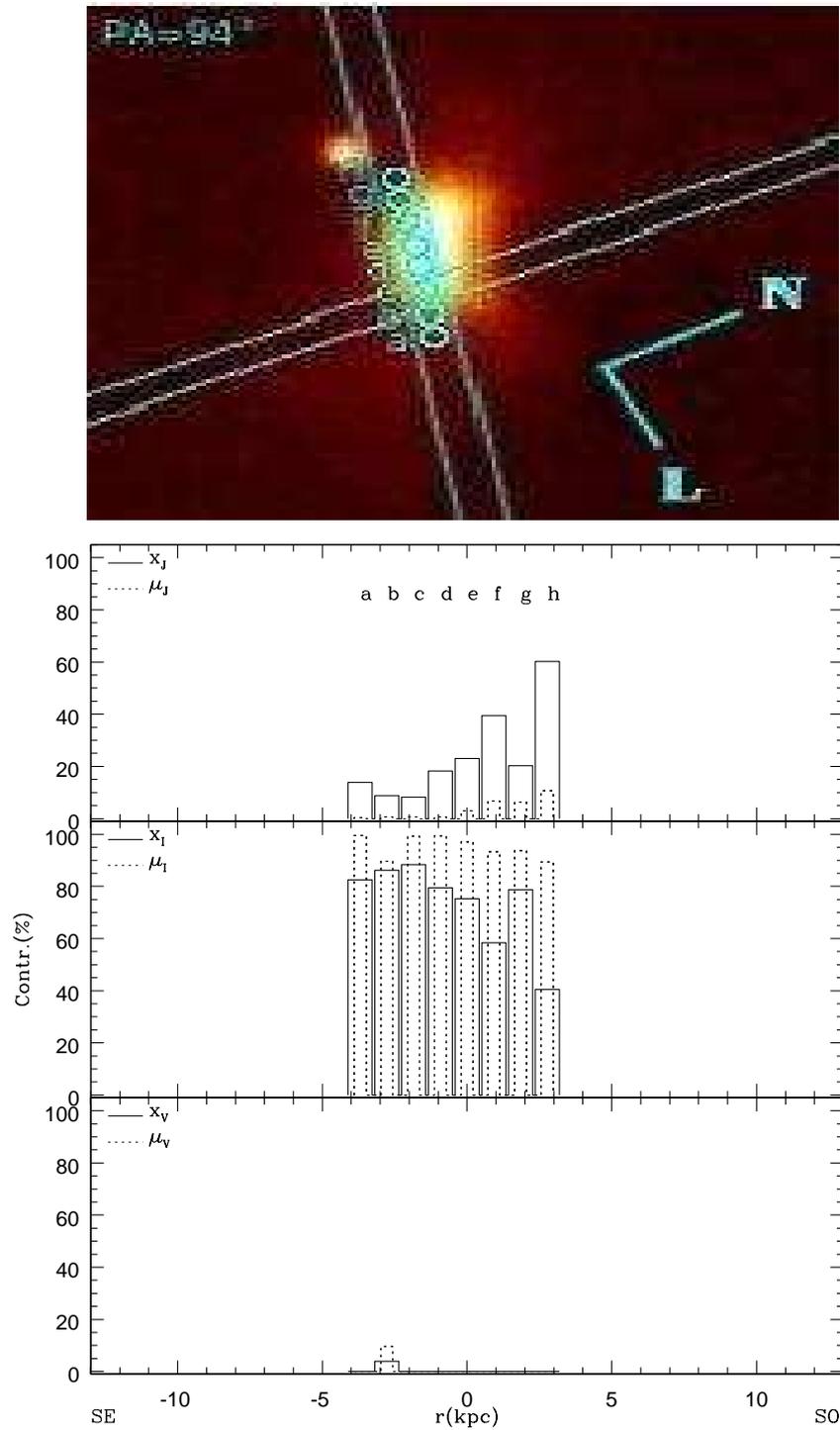


Figura 5.13: Distribuição de idade pesada em luz e em massa para a galáxia AM2058B: PA=94°.

média, pesada em luz e em massa, apresenta contribuição dominante de idade intermediária. O A_V tem contribuição máxima de 0.6 mag ao longo deste PA, o que está de acordo com o resultado encontrado para esta mesma região quando analisamos o

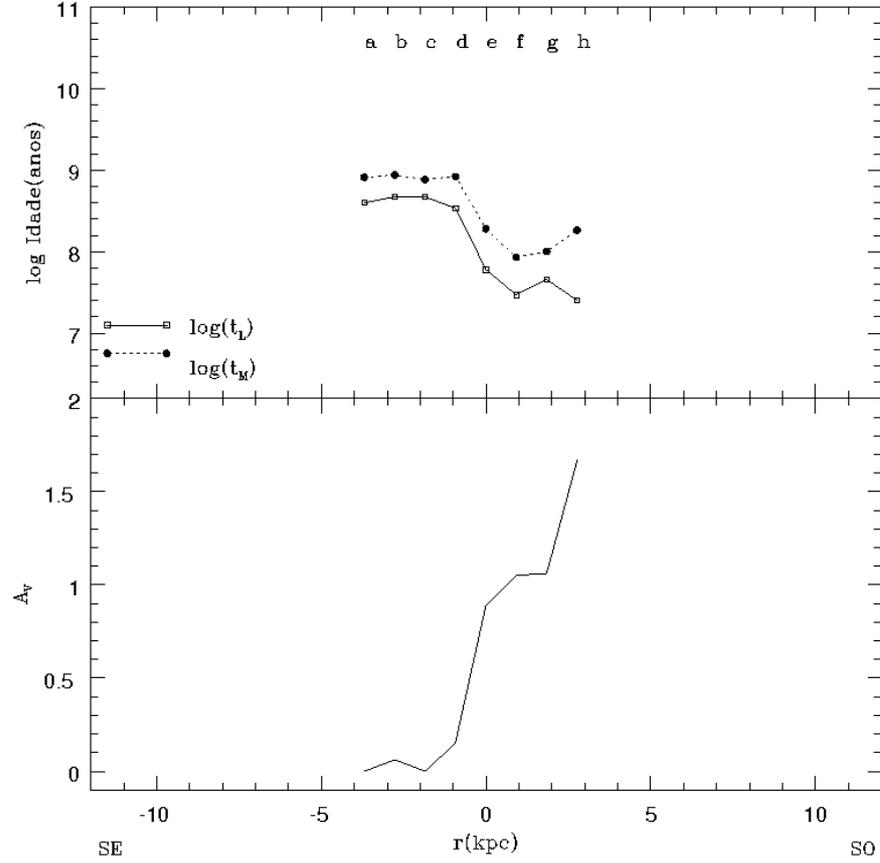


Figura 5.14: Resultados para a contribuição da população estelar média (x_j e μ_j) e do A_V ao longo do PA=94°.

Tabela 5.4: Resultado da síntese para AM2058B: PA=94°.

r(kpc)	Id	x_J (%)	x_I (%)	x_V (%)	μ_J (%)	μ_I (%)	μ_V (%)	χ^2	adev	A_V (mag)
-3.692	a	12.3	83.7	0.0	0.4	99.6	0.0	0.8	10.39	0.00
-2.769	b	8.8	90.0	0.0	0.7	99.3	0.0	1.0	6.30	0.08
-1.846	c	8.4	88.2	0.0	0.8	99.2	0.0	0.8	4.62	0.00
-0.923	d	16.8	80.9	0.0	0.6	99.4	0.0	0.5	3.24	0.20
0	e	23.1	75.1	0.0	4.0	96.0	0.0	0.7	2.62	0.96
0.923	f	39.4	58.5	0.0	6.8	93.2	0.0	0.9	3.14	1.06
1.846	g	21.3	77.9	0.0	6.2	93.8	0.0	1.2	4.11	1.06
2.769	h	59.6	41.2	0.0	10.8	89.2	0.0	1.4	6.27	1.67

PA=94°. O resultado individual da população estelar para cada abertura ao longo da fenda demonstra que a população estelar de idade intermediária tem contribuição dominante da metalicidade $Z/Z_\odot=0.02$, como encontrado para esta mesma região da fenda no ângulo de posição PA=94°. A título de ilustração, podemos ver na Fig. 5.19 o resultado individual da síntese para a abertura central desta fenda.

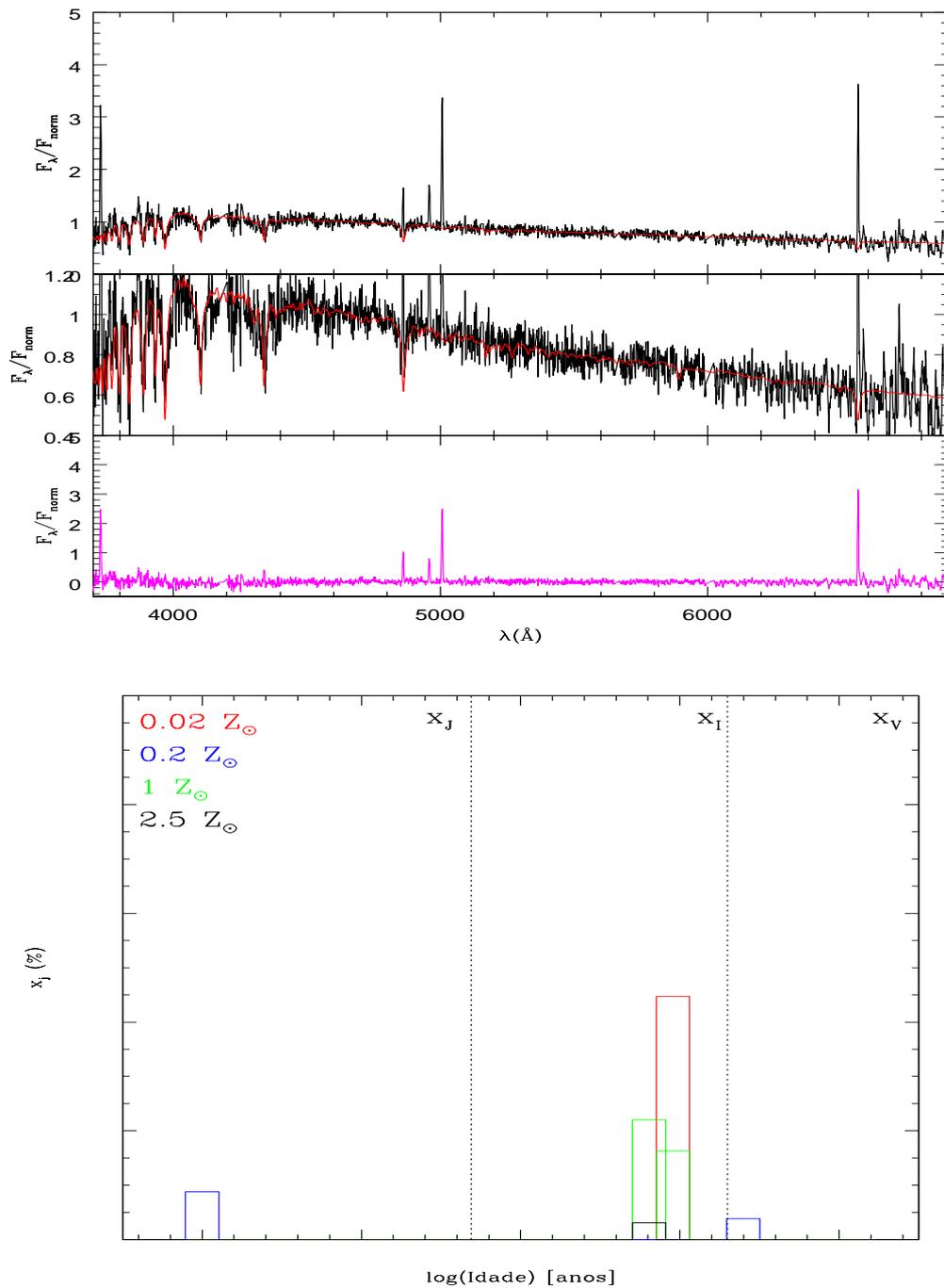


Figura 5.15: Resultado da síntese para a posição b do PA=94°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

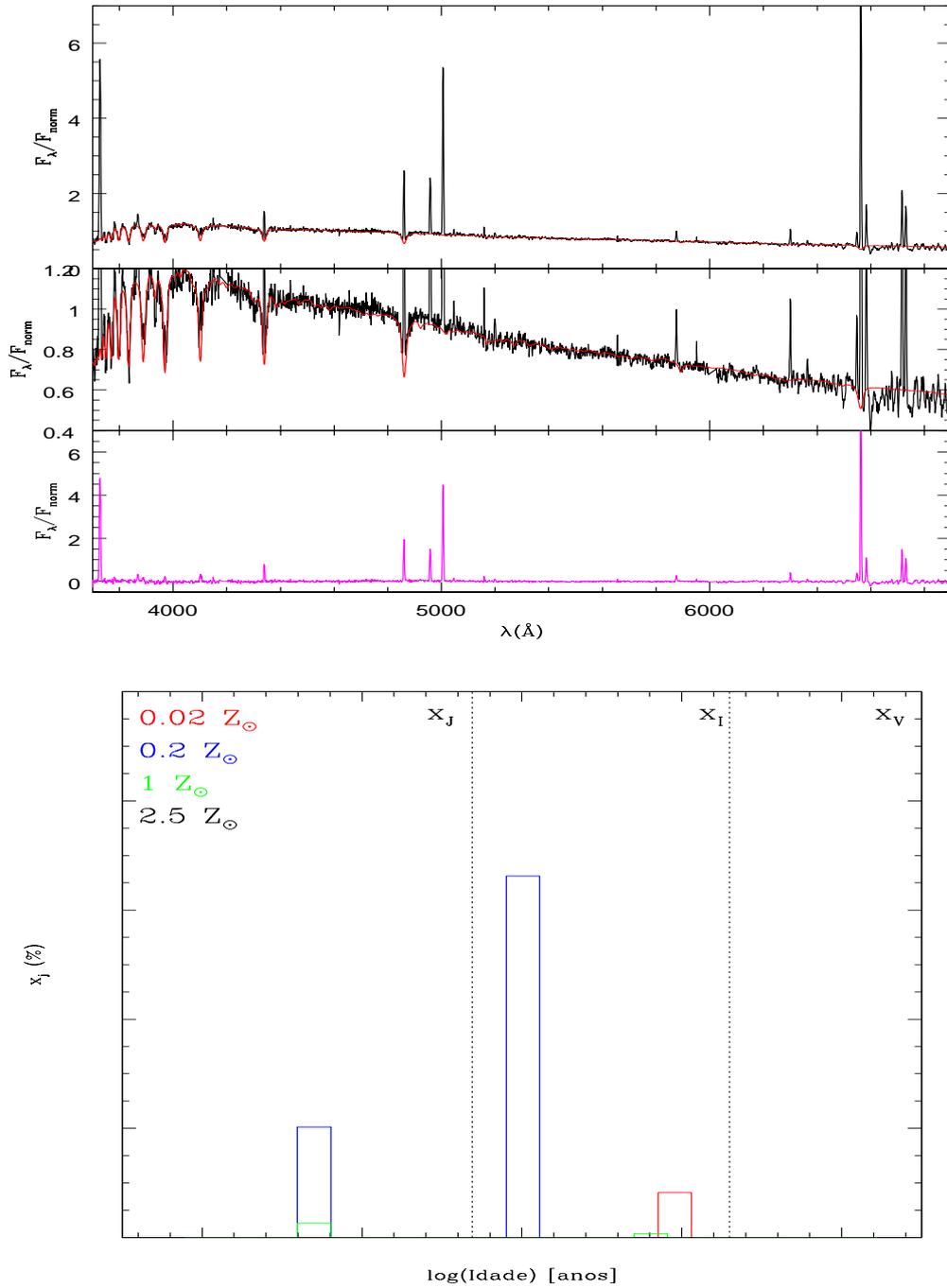


Figura 5.16: Resultado da síntese para a posição e que representa a abertura central do PA=94°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

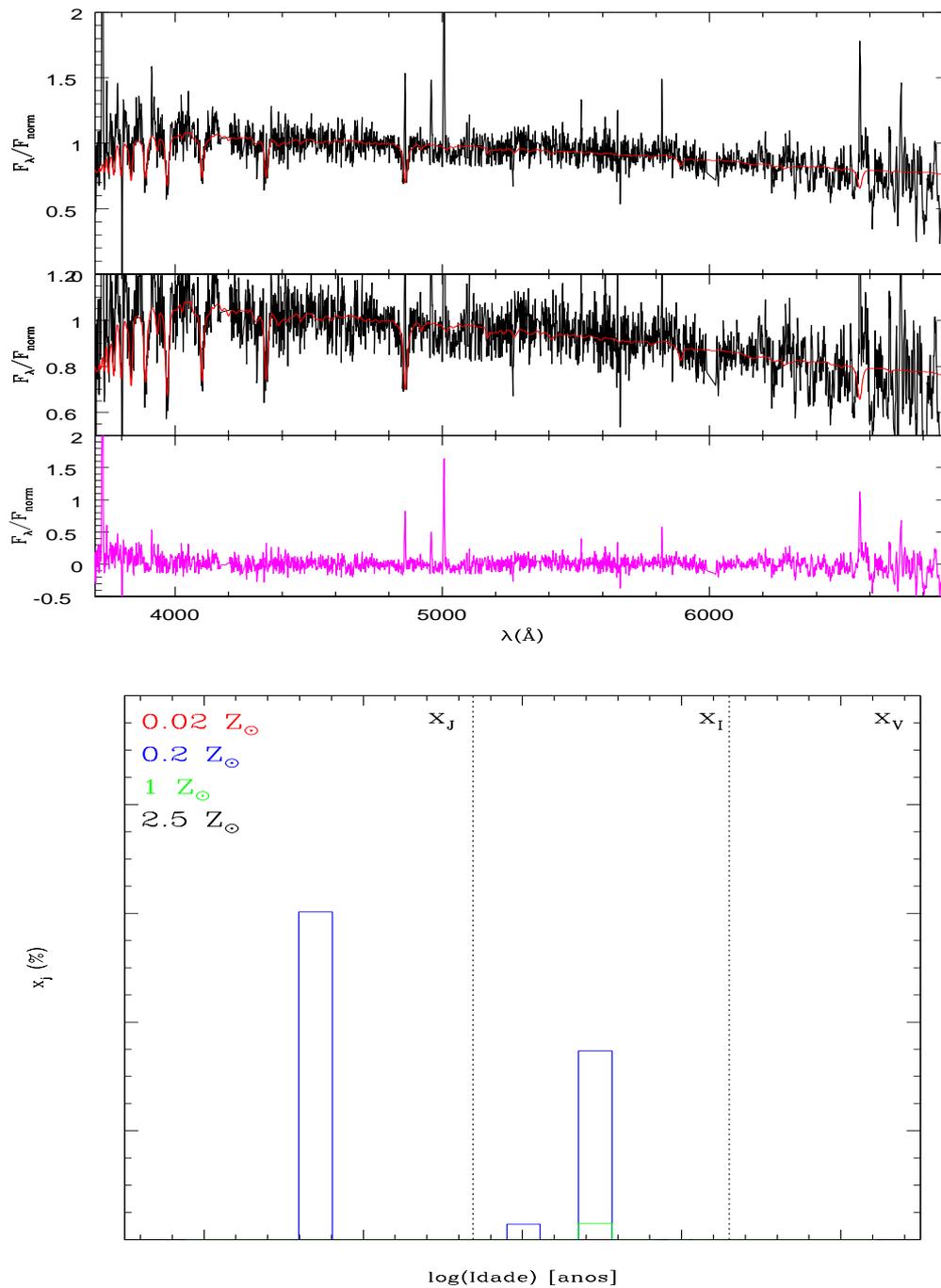


Figura 5.17: Resultado da síntese para a posição h do PA=94°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

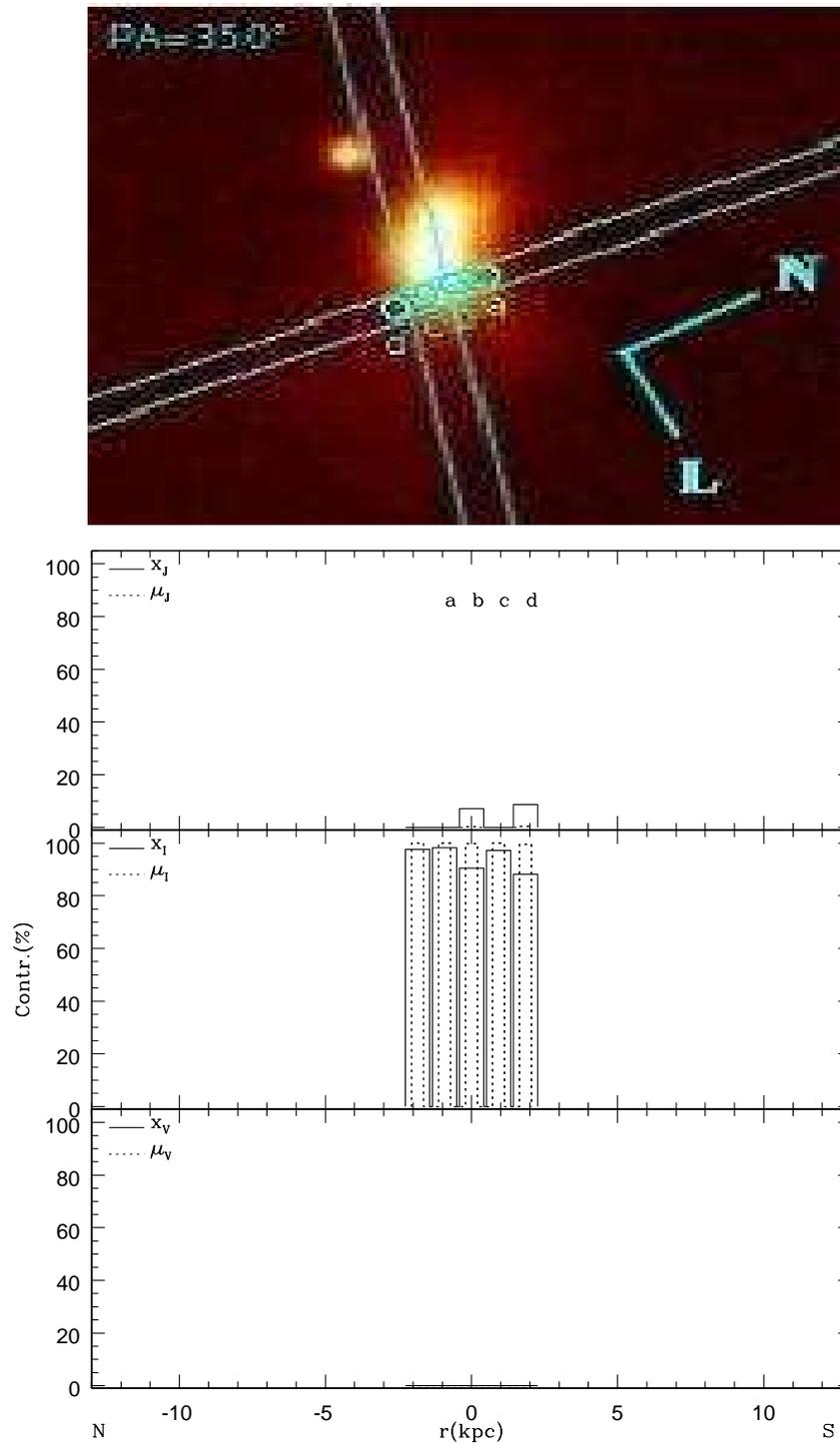


Figura 5.18: Distribuição de idade pesada em luz e em massa para a galáxia AM2058B: $PA=350^\circ$.

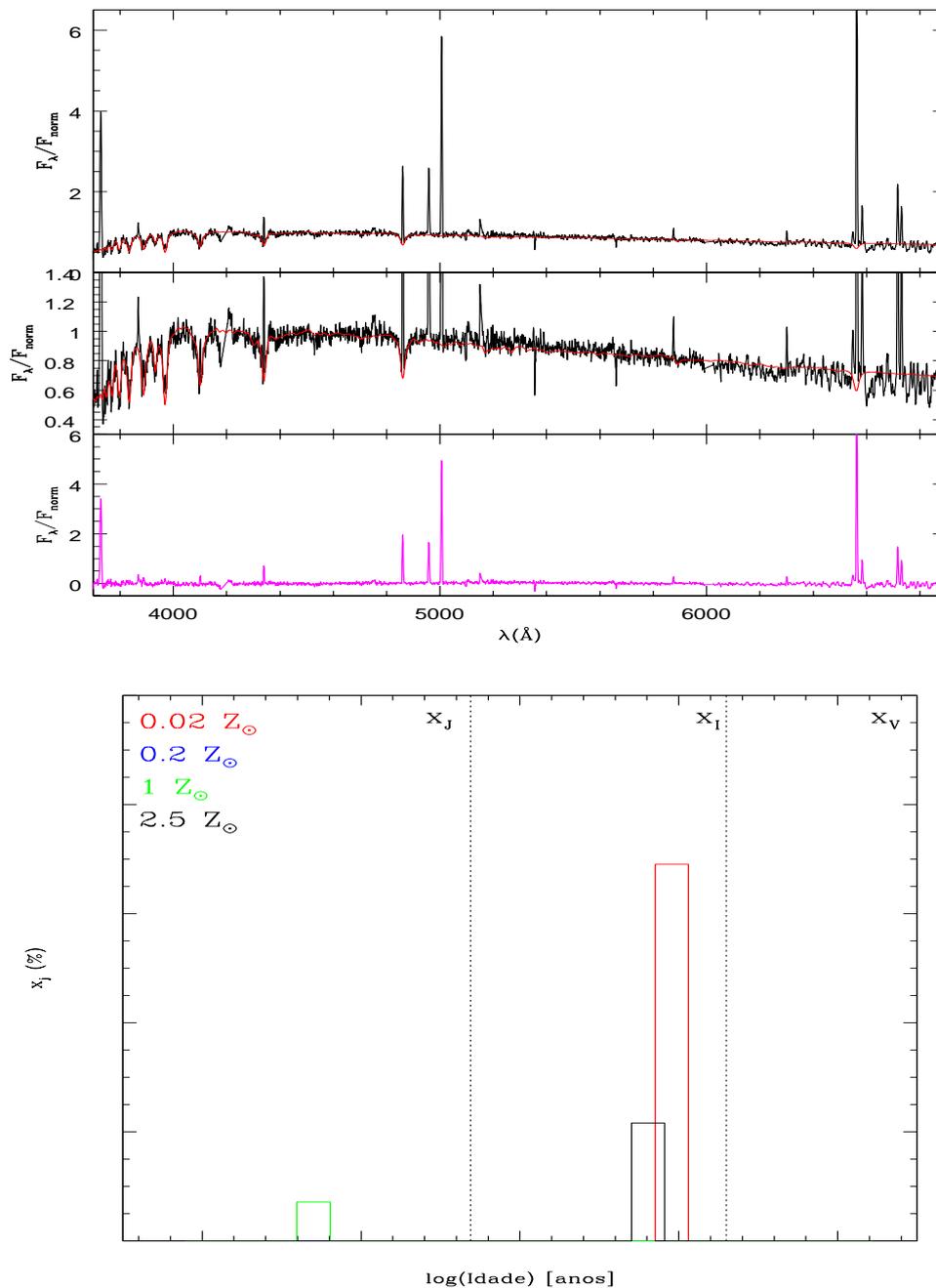


Figura 5.19: Resultado da síntese para a posição b do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2.

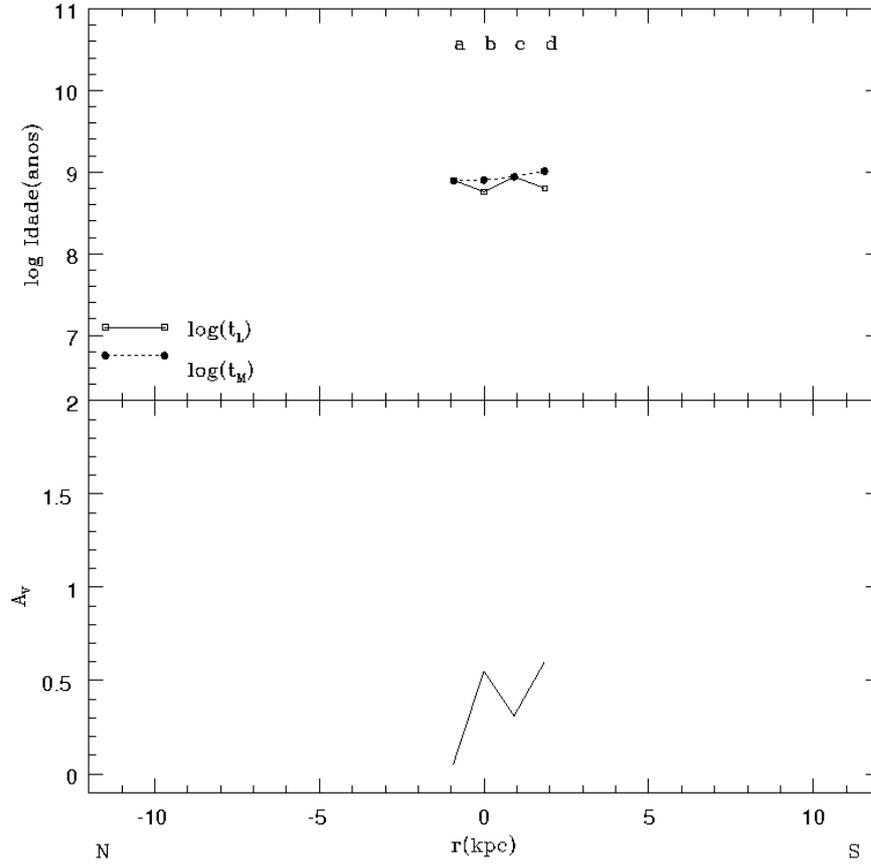


Figura 5.20: Resultados para a contribuição da população estelar média x_j e μ_j e A_V ao longo do PA=350°.

Tabela 5.5: Resultado da síntese para AM2058B: PA=94°.

r(kpc)	Id	x_J (%)	x_I (%)	x_V (%)	μ_J (%)	μ_I (%)	μ_V (%)	χ^2	adev	A_V (mag)
-0.923	a	0.0	98.2	0.0	0.0	100.0	0.0	0.6	5.30	0.05
0	b	7.5	90.2	0.0	0.2	99.8	0.0	0.6	4.37	0.55
0.923	c	0.0	97.2	0.0	0.0	100.0	0.0	1.0	5.20	0.33
1.846	d	7.7	89.0	0.0	0.2	99.8	0.0	0.5	12.41	0.62

Capítulo 6

Conclusão

Neste trabalho realizamos um estudo observacional sobre a cinemática e a história de formação estelar das galáxias do par AM2058-381. Os dados utilizados consistem de espectros de fenda longa obtidos com Gemini Multi-Object Spectrograph (GMOS) anexado ao telescópio Gemini Sul, e cobrem um intervalo espectral de 3300 à 6930 Å. Para a galáxia principal (AM2058A) foram extraídos ao todo 57 espectros unidimensionais, resultantes das três diferentes orientações da fenda, e 12 espectros unidimensionais obtidos para a galáxia companheira, nos dois ângulos de posição observados. A região observada em cada espectro representa uma área de $918 \times 785 \text{pc}^2$ para AM2058A e $930 \times 795 \text{pc}^2$ para AM2058B. Nestes espectros unidimensionais identificamos 13 linhas de emissão: [OII] $\lambda 3727$, H δ $\lambda 4101$, H γ $\lambda 4340$, H β $\lambda 4861$, [OIII] $\lambda 4959$, [OIII] $\lambda 5007$, HeI $\lambda 5878$, [OI] $\lambda 6300$, [NII] $\lambda 6549$, H α $\lambda 6563$, [NII] $\lambda 6584$, [SII] $\lambda 6717$ e [SII] $\lambda 6730$, e 13 linhas de absorção: H9 $\lambda 3835$, H8 $\lambda 3889$, CaII(H) $\lambda 3934 \text{Å}$, CaII(K) $\lambda 3968$, banda G $\lambda 4300$, HeI $\lambda 4471$, HeI, HeI $\lambda 5016$, Mg $\lambda 5173$, Mg $\lambda 5164$, FeI $\lambda 5270$, FeI $\lambda 5406$ e NaI $\lambda 5892$ além das linhas de Balmer (H δ , H γ , H β e H α) que também estão em absorção.

Os principais resultados encontrados neste trabalho são resumidos a seguir.

6.1 Cinemática do gás

Construímos a curva de rotação para as galáxias do par através do deslocamento Doppler das linhas de emissão mais brilhantes do espectro (H β , [OIII] $\lambda 5007$, H α e [NII] $\lambda 6584$). A velocidade sistêmica encontrada para cada galáxia do par foi aquela referente ao respectivo centro, $v_s = 12178 \text{ km s}^{-1}$ para AM2058A e $v_s = 12316 \text{ km s}^{-1}$ para AM2058B. Adotando $H_0 = 75 \text{ km/s/Mpc}$, encontramos que AM2058A está à uma distância de 162 Mpc, e AM2058B está à 164 Mpc.

Através da curva de rotação, podemos ver que AM2058A apresenta um braço perturbado na direção N, e vemos que os pontos da curva correspondentes a esta região mostram uma velocidade circular menor que aquela que corresponderia ao seu raio, ou seja, a velocidade do gás parece estar perdendo momento angular com respeito ao disco. A deflexão máxima da curva de rotação é de 200 km s^{-1} .

O perfil de emissão em $H\alpha$ ao longo das diferentes posições da fenda mostra picos que correspondem às três regiões HII muito luminosas (n° 4, 5 e 10), catalogadas por Ferreira et al. (2008) para esta galáxia. Além de apresentar picos de emissão de $H\alpha$, estas regiões também demonstram afastamento da curva de rotação, e nota-se uma diferença de 40 kms^{-1} nas velocidades quando comparadas às velocidades dos pontos adjacentes.

A galáxia companheira apresenta um campo de velocidades muito complexo, confirmando a sua forma irregular, e o fluxo em $H\alpha$ é da ordem daquele encontrado para as regiões HII muito luminosas n° 4 e 5.

Encontramos a velocidade circular máxima da galáxia principal através de um ajuste de mínimo quadrados não-linear para curva de rotação, assumindo que o gás se move sob um potencial gravitacional logarítmico, seguindo órbitas fechadas no plano do céu, caracterizadas por sua inclinação com respeito à linha de visada, $i=68^\circ$, e o ângulo de posição da fenda com respeito à linha dos nodos α . Este ajuste foi feito para dois ângulos de posição, $PA=42^\circ$ e $PA=350^\circ$, pois eles passam mais próximo do eixo maior da galáxia. Assumimos a velocidade circular máxima ($v_c=314 \text{ km s}^{-1}$) encontrada para o ângulo de posição $PA=350^\circ$, pois obtivemos um melhor ajuste da curva de rotação para este ângulo de posição. Para a galáxia companheira não foi possível realizar o ajuste pois o campo de velocidades é muito complexo.

A velocidade circular máxima desprojetada nos permitiu obter a massa dinâmica para AM2058A, $\mathcal{M}_A(r) = 2.1 \times 10^{11} \mathcal{M}_\odot$. A massa dinâmica para a galáxia companheira foi estimada em $\mathcal{M}_B(r) = 4.6 \times 10^{10} \mathcal{M}_\odot$. A razão entre as massas do par de $\frac{\mathcal{M}_B}{\mathcal{M}_A} = 0.21$ confirma que o par é uma fusão menor (*minor merger*).

6.2 História da formação estelar

Realizamos um estudo da população estelar para as diferentes orientações da fenda em ambas as galáxias. Encontramos que a região central da galáxia principal AM2058A, por onde passam as fendas $PA=42^\circ$ e $PA=350^\circ$, é dominada pela população estelar velha com metalicidade solar e subsolar, porém observamos diferentes

contribuições através de seu disco e braços espirais. Podemos ver que nestas regiões a distribuição de idades, pesada em luz, para PA= 42° tem contribuição dominante de idade intermediária, com metalicidade solar e sobre solar. Já para PA= 350° observamos que a população estelar dominante é jovem, com metalicidade sub solar. Como as duas fendas passam pelos braços espirais e pelo disco da galáxia, esperávamos obter resultados semelhantes para as duas direções, porém isso não ocorre. Considerando que PA= 350° passa pelo centro das duas galáxias, este excesso de formação estelar recente observado nesta direção poderia ser resultado da passagem da companheira através da galáxia principal. Além disso, observamos que a população estelar da galáxia companheira também apresenta metalicidade subsolar. Porém, para confirmar esta hipótese da passagem nesta direção é necessário analisar a interação através de modelos quimio-hidrodinâmicos, que incluem formação estelar (Perez et al., 2011).

Para esta galáxia foram catalogadas 11 regiões HII muito luminosas, porém só temos espectros para três delas: 4, 5 e 10. A síntese de população estelar demonstra que as três regiões HII tem idade de 5 M_{anos} e metalicidade subsolar. Entretanto, regiões HII pertencentes a pares de galáxias em fusão maior têm metalicidade maior que a solar (Duc & Mirabel, 1997, 1998).

As regiões HII 4, 5 e 10 apresentam uma cinemática diferenciada em relação ao disco da galáxia, como podemos ver nas curvas de rotação da Seção 3.2.1, que mostram aumento da velocidade circular com respeito ao disco. Estudos sobre a velocidade de regiões HII muito luminosas em galáxias interagentes apresentam cinemática desacoplada do restante da galáxia (Bournaud et al., 2004).

Para a galáxia companheira AM2058B observamos um gradiente de idades da população estelar que vai de idade intermediária no extremo SE, até jovem no extremo SO (10^8 - 10^6 anos). Este gradiente está acompanhado por um decréscimo da metalicidade e um aumento gradativo do avermelhamento estelar.

Este par está em *minor merger* (ver seção 4.3), portanto, efeitos muito drásticos na cinemática e na formação estelar não são observados, como os encontrados na interação entre galáxias massivas (galáxia antena). Porém, podemos ver através dos resultados individuais para as diferentes aberturas ao longo dos diferentes PAs que o histórico de formação estelar é muito complexo, tanto para as regiões externas dos braços espirais da componente primária do par quanto para a galáxia companheira. A região HII n° 4 mostra que o último evento de formação estelar da galáxia principal ocorreu há 1 M_{anos} .

6.3 Perspectivas

A interação entre as galáxias do par será modelada utilizando simulação numérica de N corpos. Através deste estudo será possível determinar quando ocorreu a passagem perigaláctica da galáxia secundária pela primária, a trajetória, a idade do início e o estágio atual da interação. Como exemplo deste tipo de análise, podemos citar o estudo feito para os pares AM2306-721 e AM2322-821, por Krabbe et al. (2008) e Krabbe et al. (2011), respectivamente. Os resultados obtidos através da cinemática do gás (curvas de rotação, inclinação e massa dinâmica das galáxias) serão utilizados como parâmetro de entrada para a simulação numérica da interação.

As condições físicas do gás, como temperatura e densidade eletrônica, e abundância química do Oxigênio, Nitrogênio, Enxofre, Hélio das regiões observadas serão obtidas através dos espectros livres da contribuição da população estelar. Uma análise preliminar sobre a abundância do Oxigênio é ilustrada na Fig.6.1, vemos que a galáxia principal apresenta um intervalo de metalicidade entre $0.4 Z/Z_{\odot}$ e $2 Z/Z_{\odot}$. Entretanto, a galáxia secundária apresenta metalicidade menor que a solar ($0.4 < Z/Z_{\odot} < 0.6$).

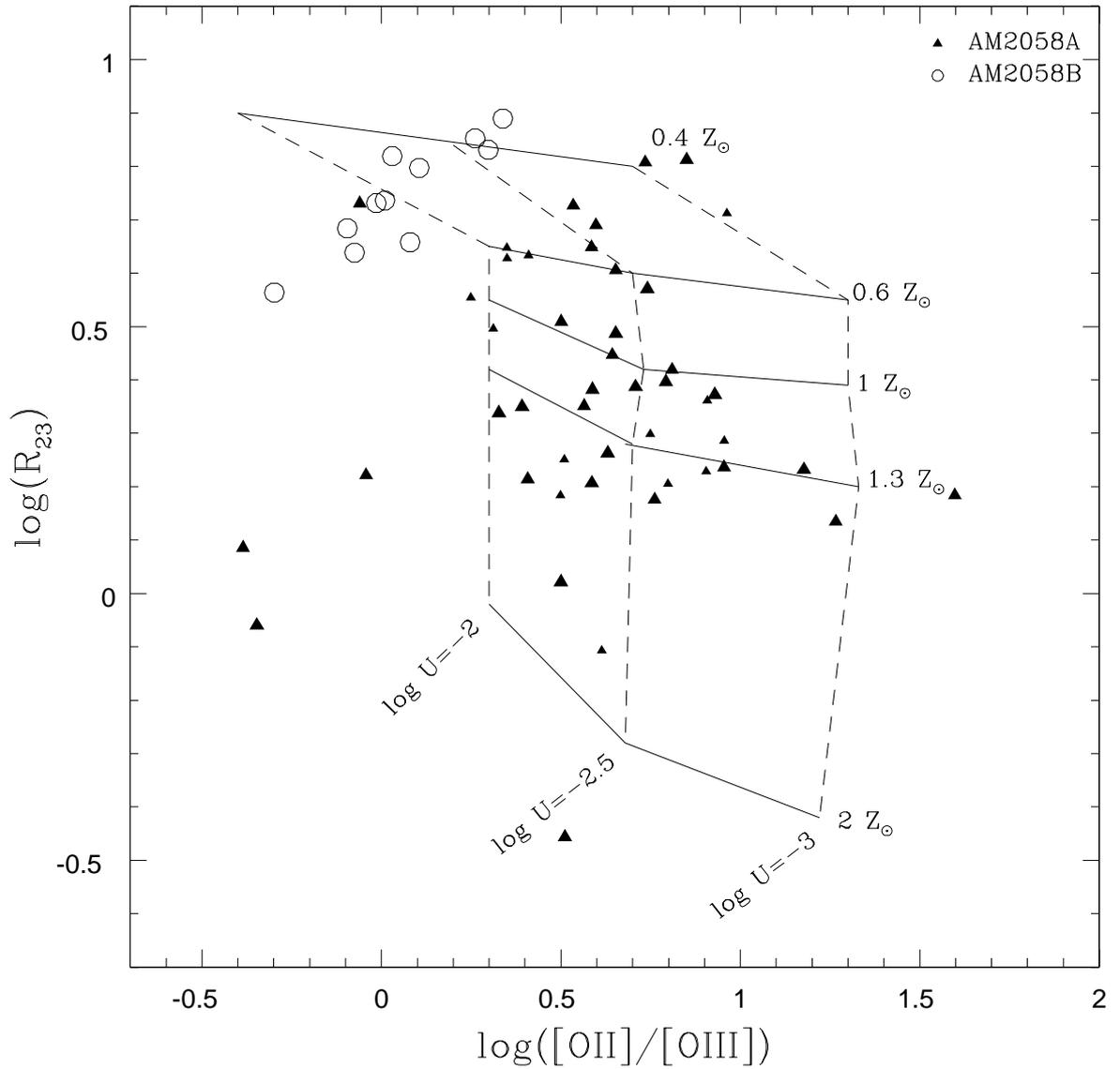


Figura 6.1: Relação $\log(R_{23}) \times \log ([\text{OII}]/[\text{OIII}])$ (Pagel et al., 1979) para regiões individuais da AM2058-381. As curvas representam modelos de fotoionização obtidos com o código Cloudy/96.03. Onde: $R_{23} = \left[[\text{OII}]\lambda 3727 + ([\text{OIII}]\lambda 4959 + [\text{OIII}]\lambda 5007) \right] / \text{H}\beta$.

Apêndice A

Resultados individuais da síntese para AM2058A: PA=42°

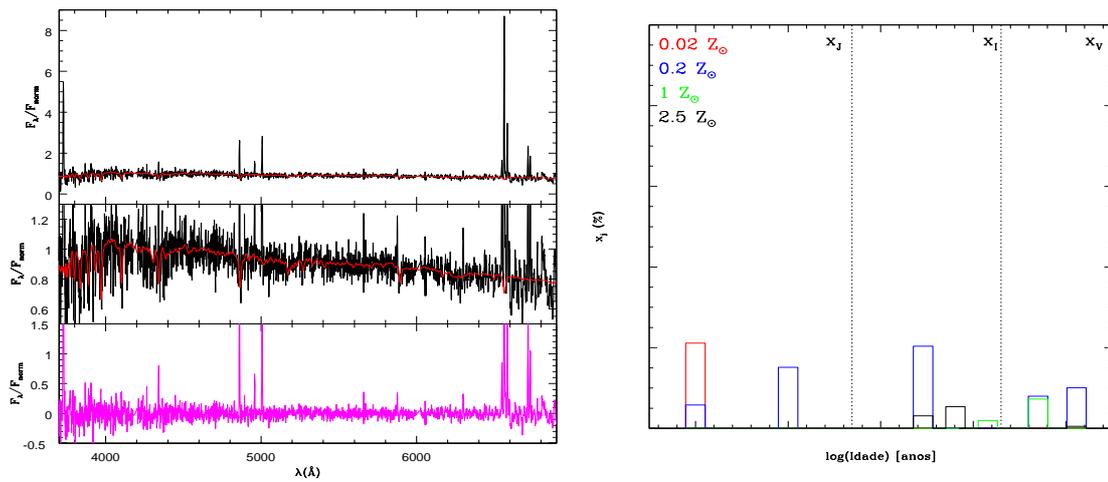


Figura A.1: Resultado da síntese para a abertura b do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

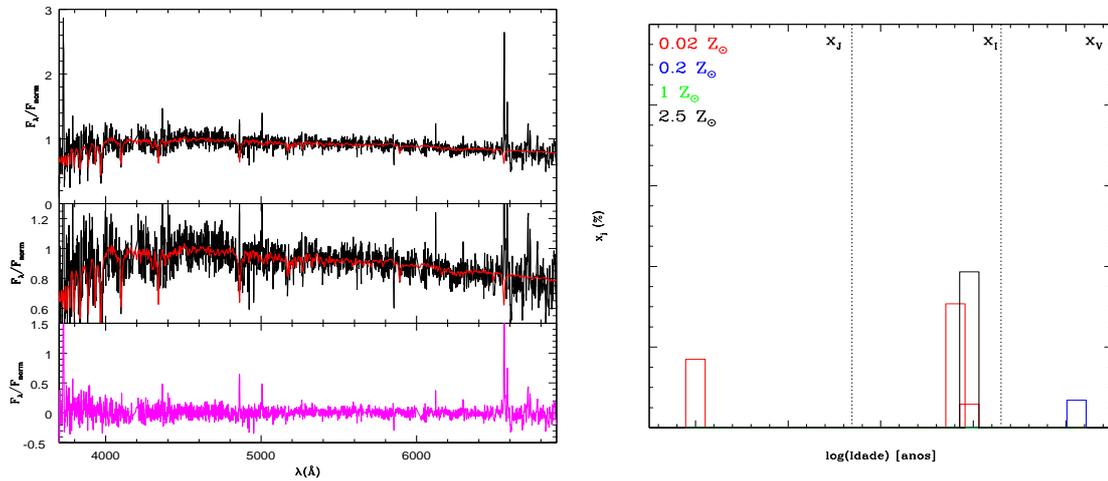


Figura A.2: Resultado da síntese para a abertura c do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

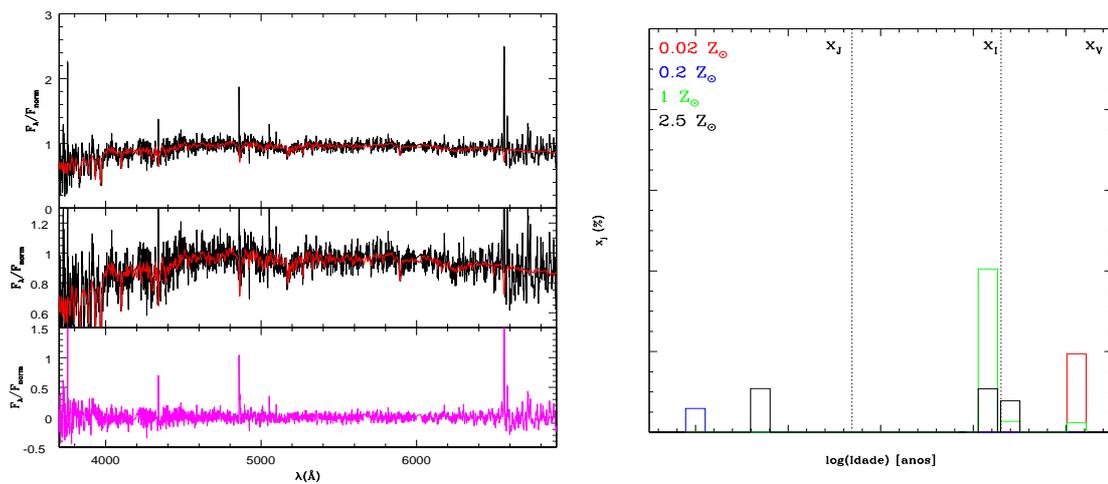


Figura A.3: Resultado da síntese para a abertura e do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

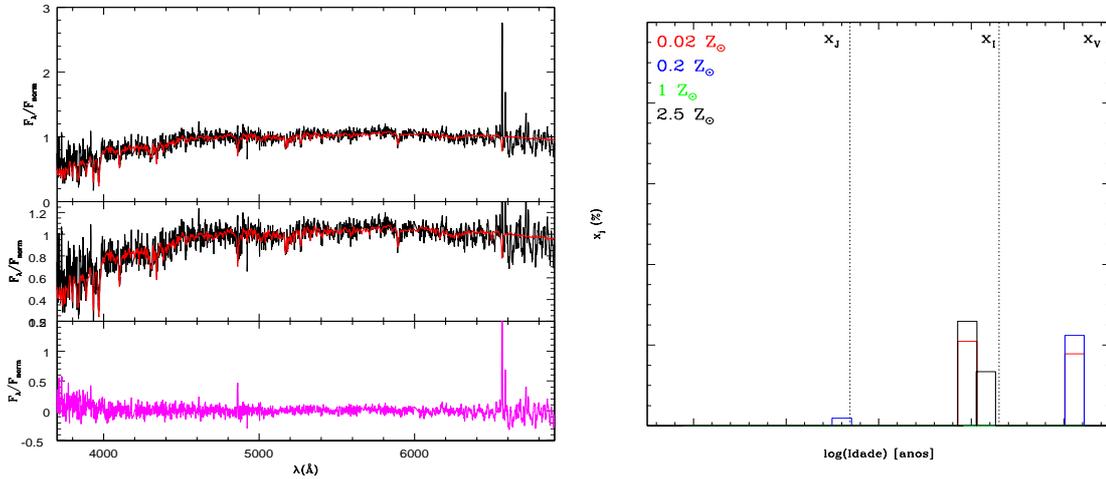


Figura A.4: Resultado da síntese para a abertura f do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

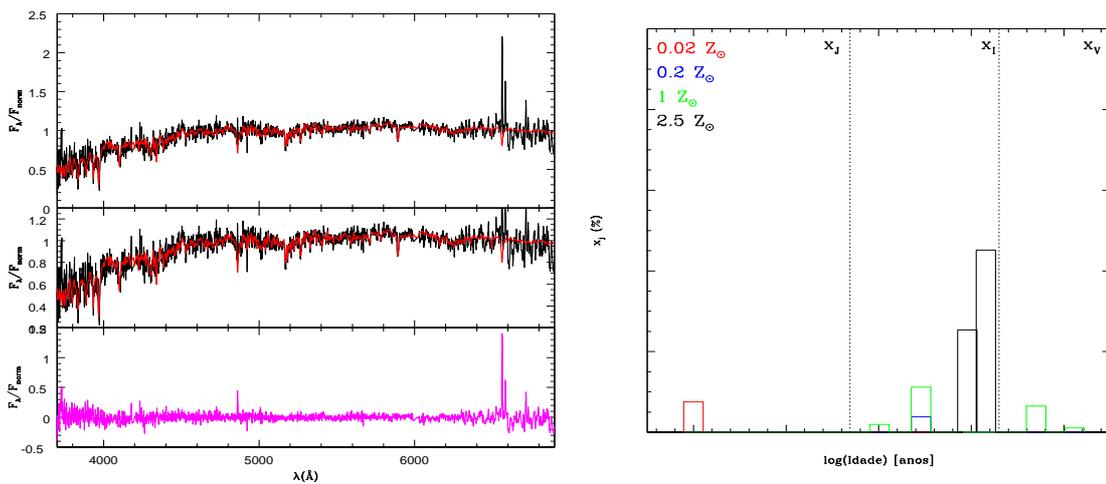


Figura A.5: Resultado da síntese para a abertura g do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

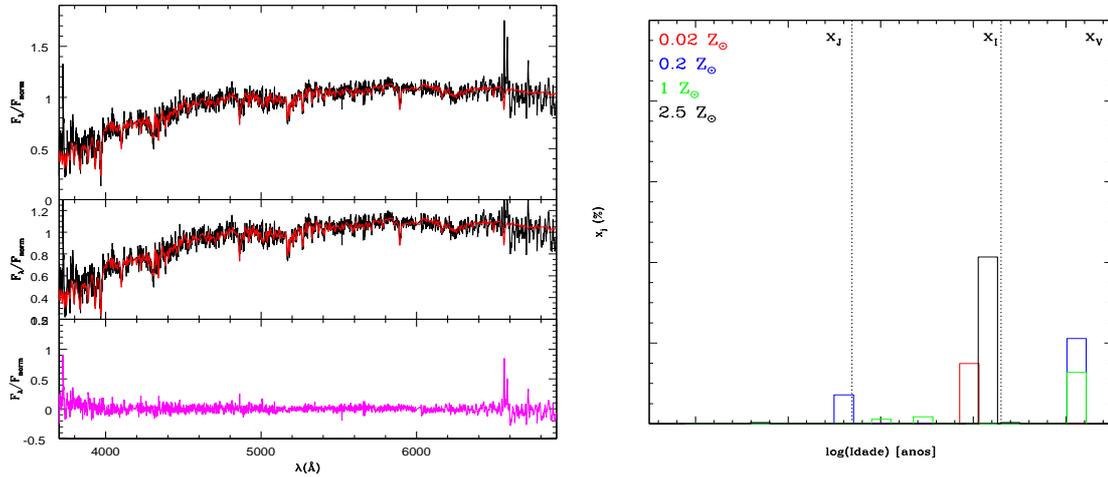


Figura A.6: Resultado da síntese para a abertura h do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

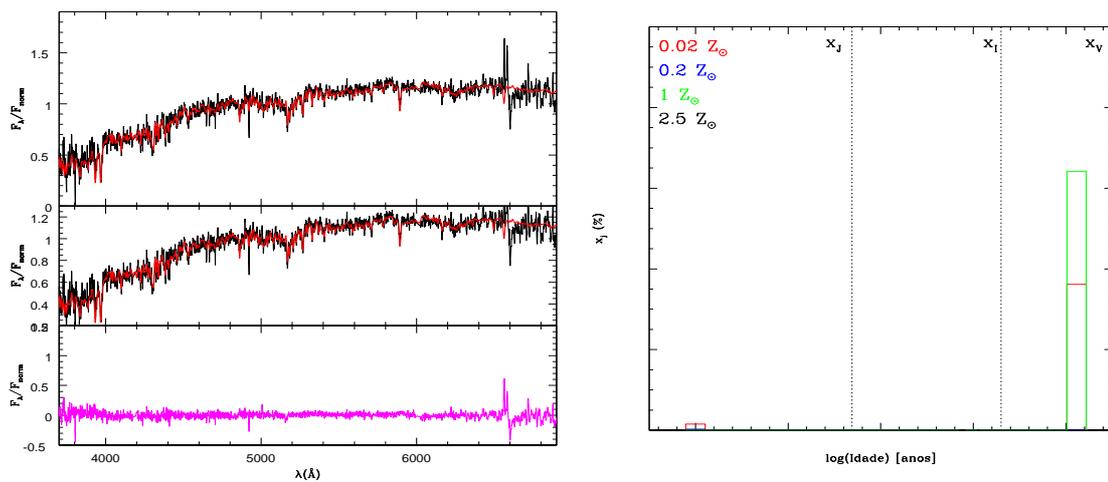


Figura A.7: Resultado da síntese para a abertura i do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

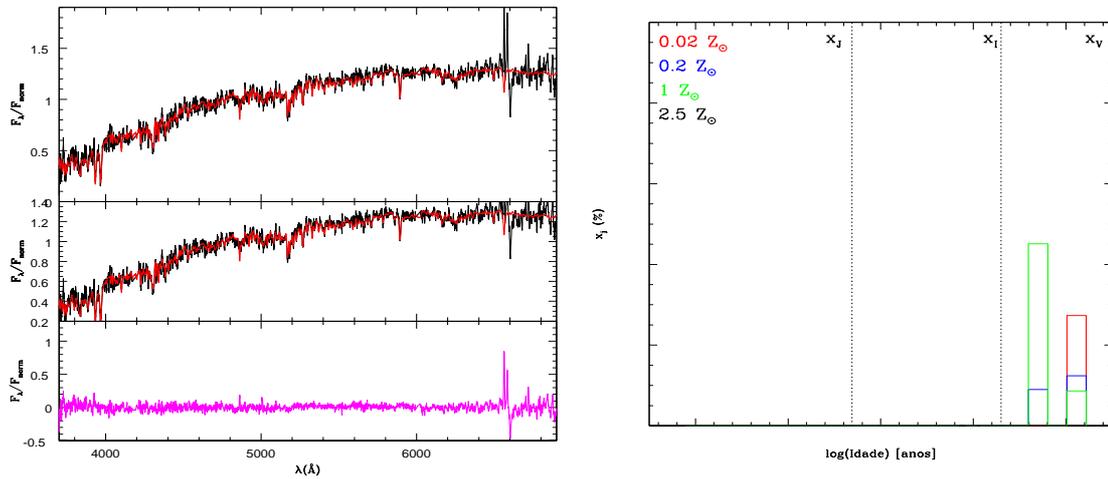


Figura A.8: Resultado da síntese para a abertura j do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

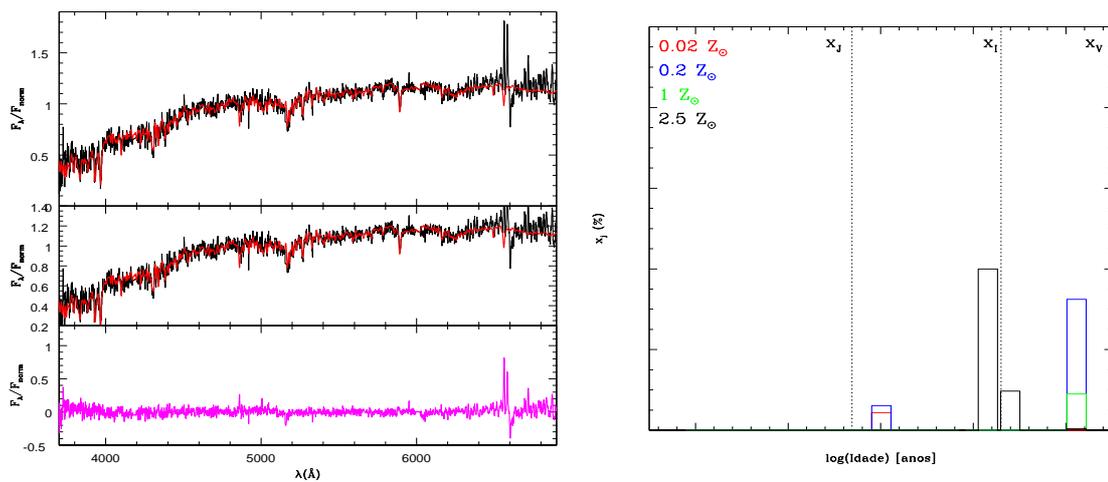


Figura A.9: Resultado da síntese para a abertura k do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

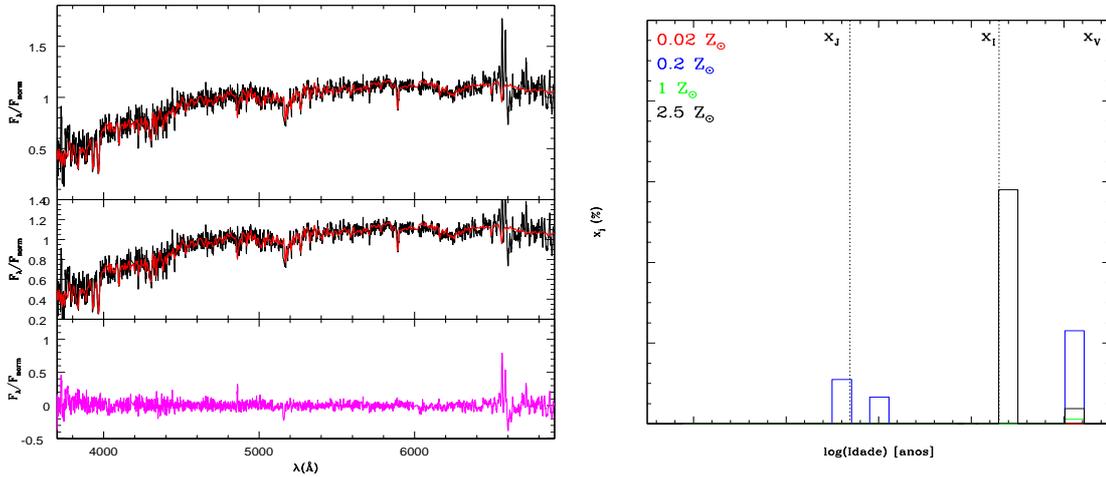


Figura A.10: Resultado da síntese para a abertura l do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

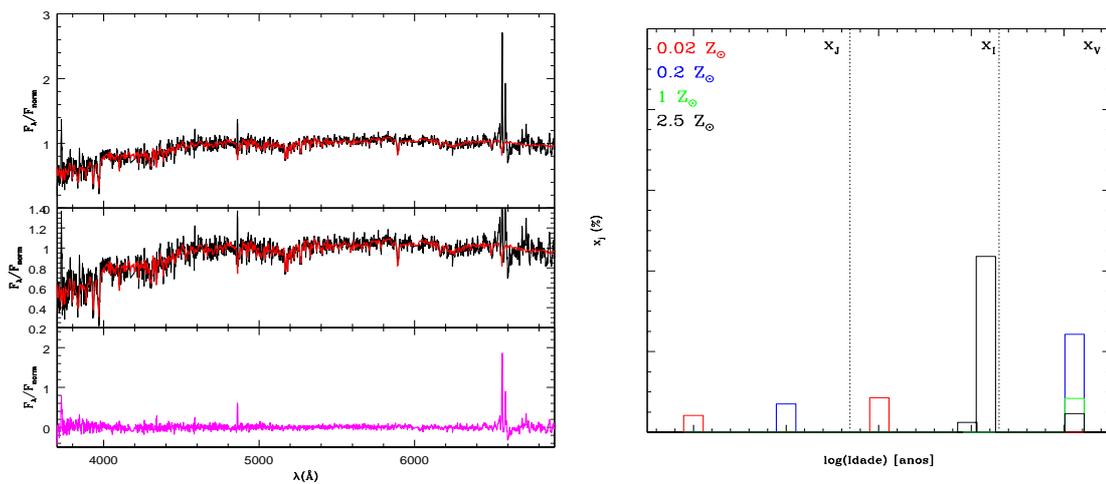


Figura A.11: Resultado da síntese para a abertura m do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

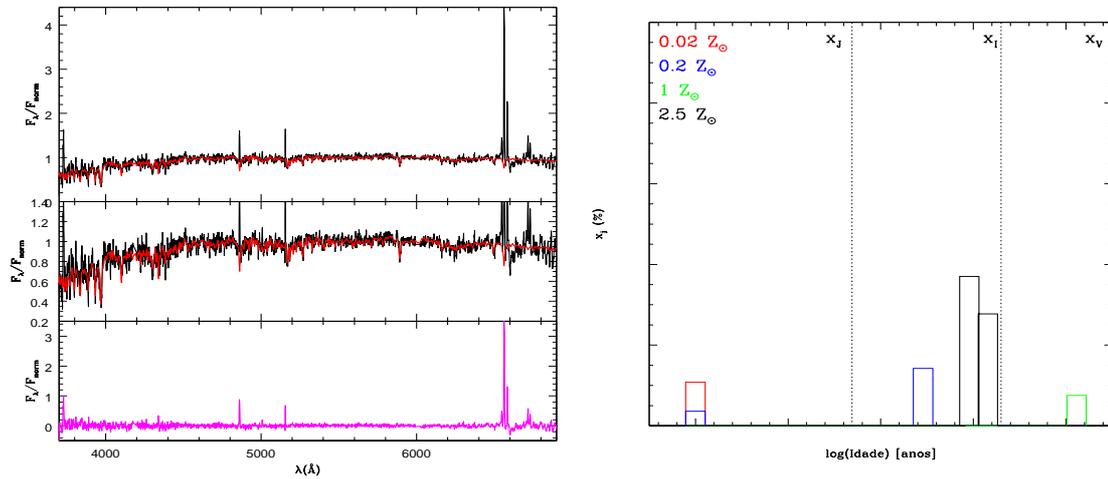


Figura A.12: Resultado da síntese para a abertura n do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

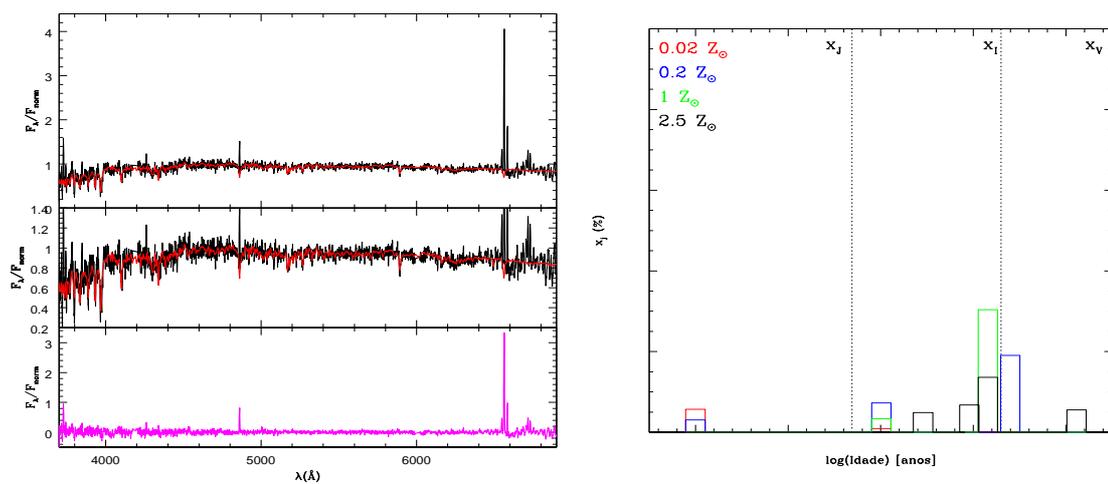


Figura A.13: Resultado da síntese para a abertura o do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

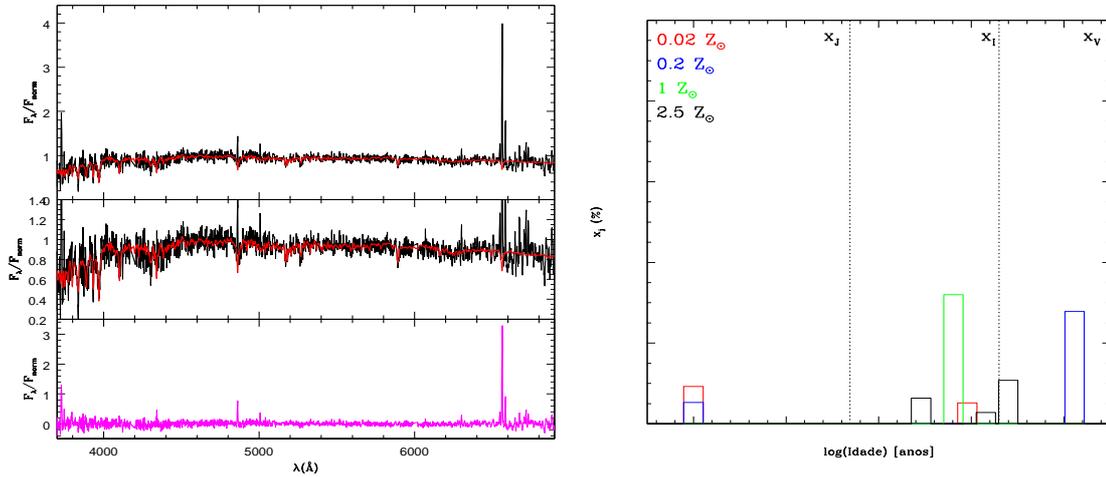


Figura A.14: Resultado da síntese para a abertura p do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

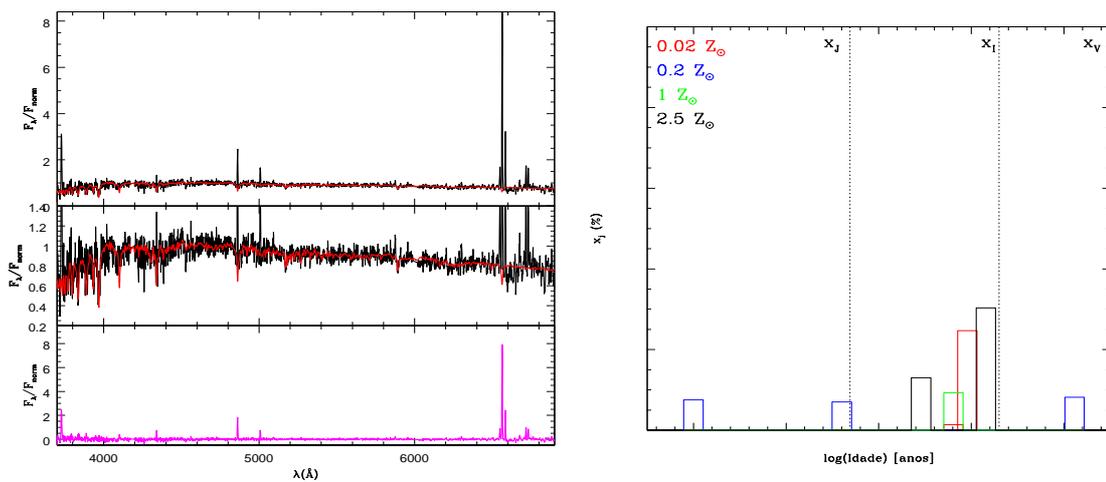


Figura A.15: Resultado da síntese para a abertura q do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

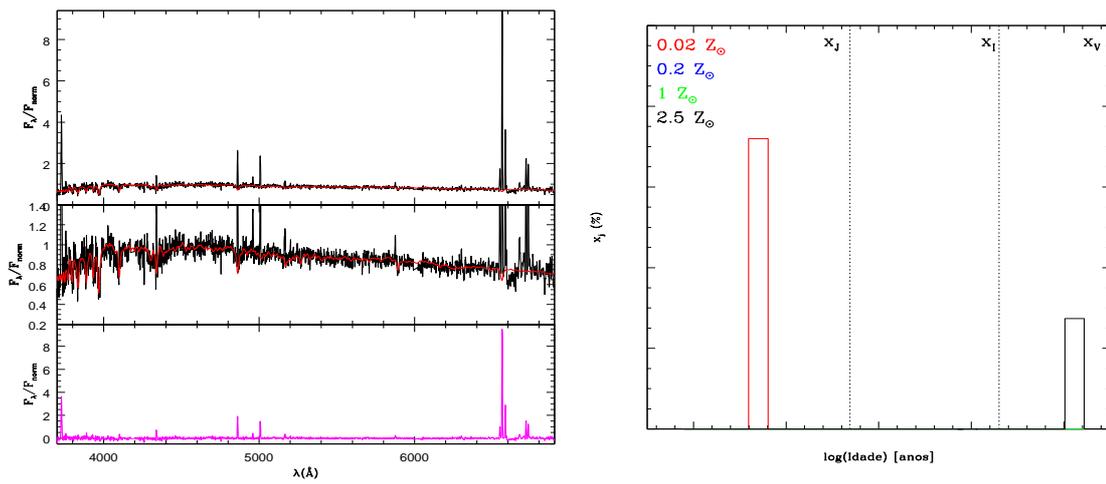


Figura A.16: Resultado da síntese para a abertura r do PA=42°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

Apêndice B

Resultados individuais da síntese para AM2058A: PA=125°

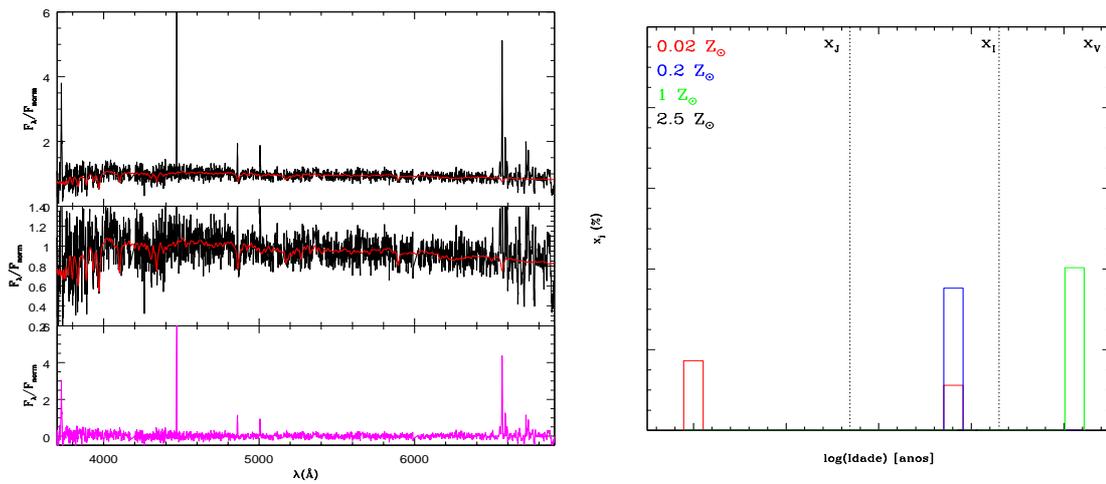


Figura B.1: Resultado da síntese para a abertura a do PA=125°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

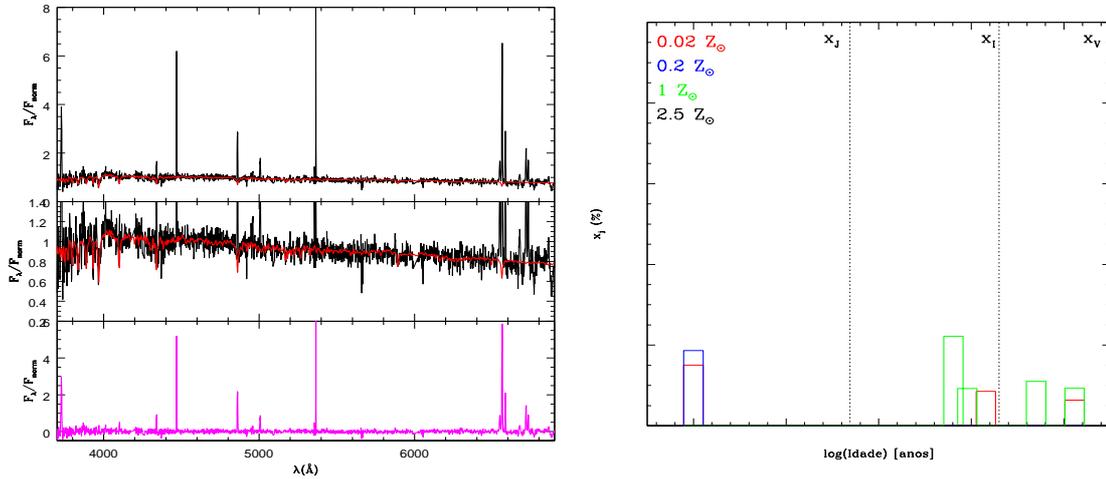


Figura B.2: Resultado da síntese para a abertura b do PA=125°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

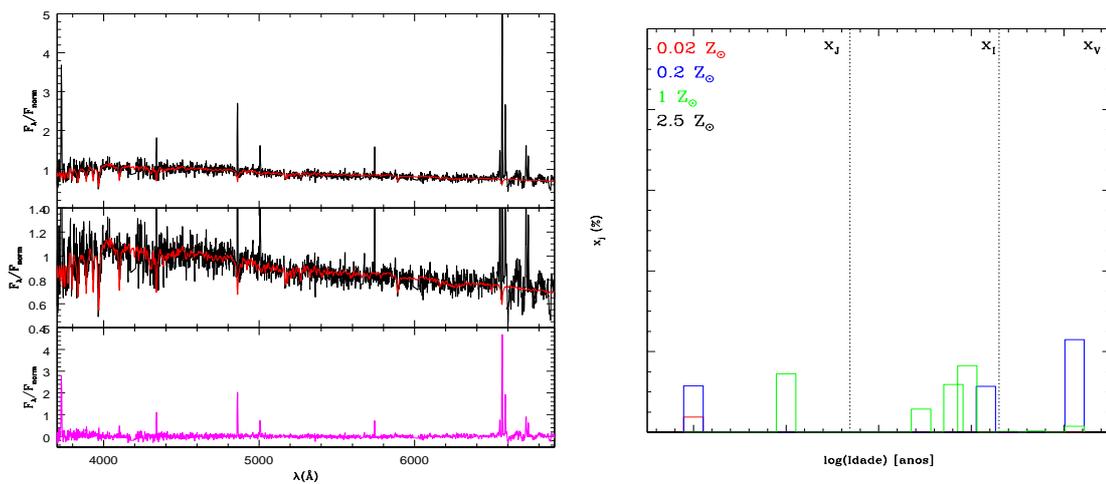


Figura B.3: Resultado da síntese para a abertura d do PA=125°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

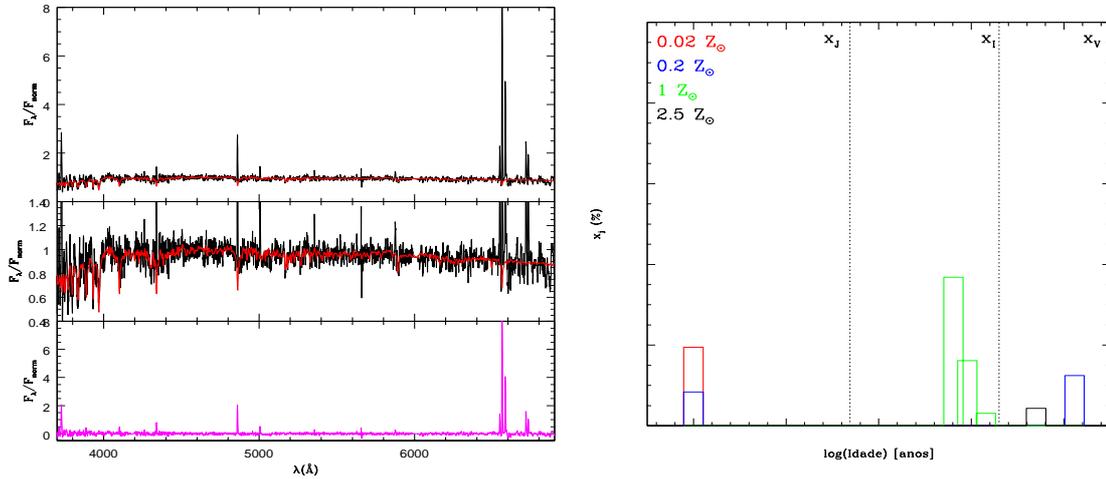


Figura B.4: Resultado da síntese para a abertura e do PA=125°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

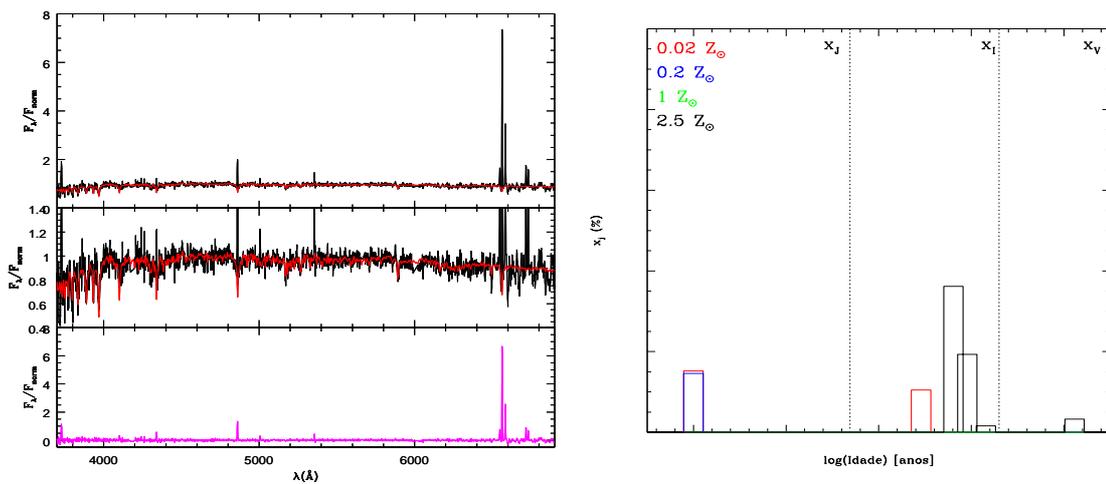


Figura B.5: Resultado da síntese para a abertura f do PA=125°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

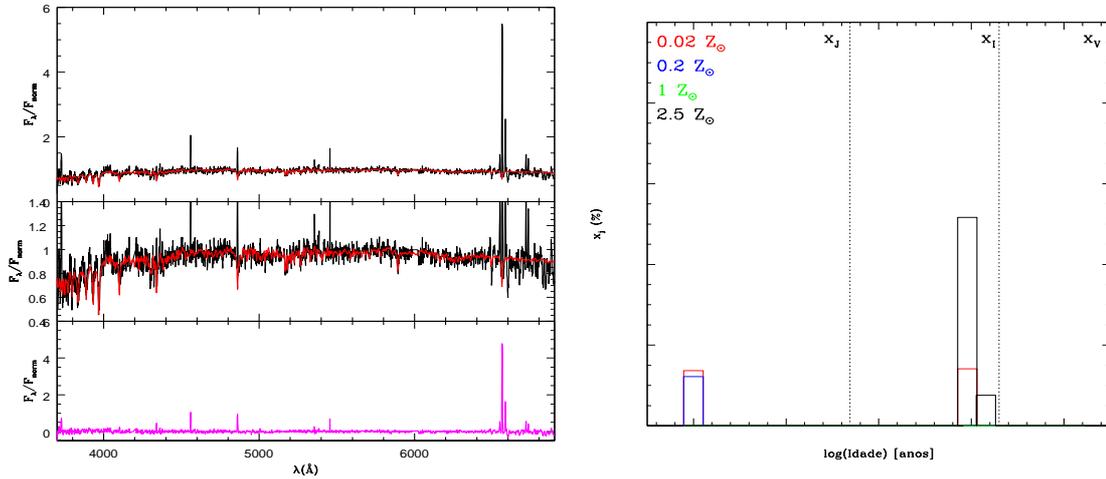


Figura B.6: Resultado da síntese para a abertura g do PA=125°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

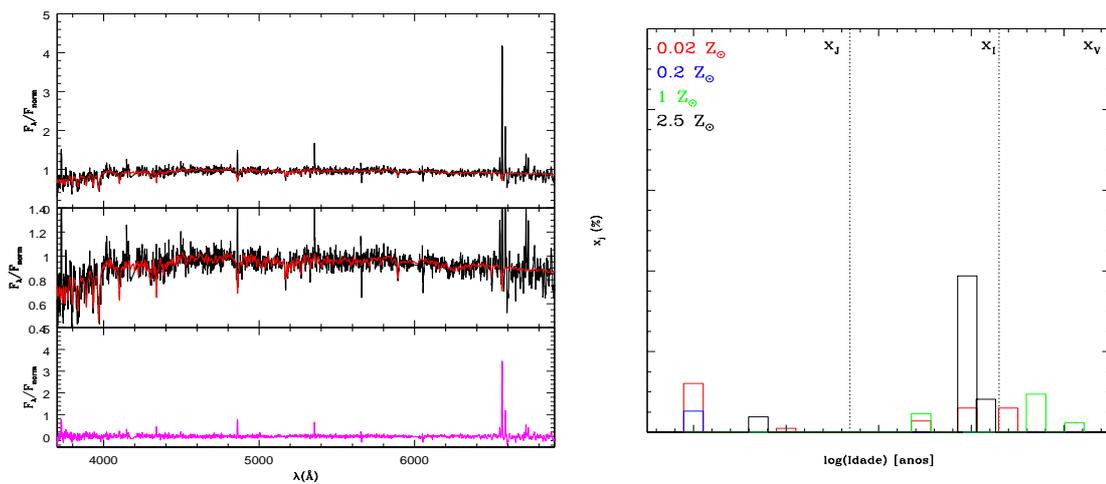


Figura B.7: Resultado da síntese para a abertura h do PA=125°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

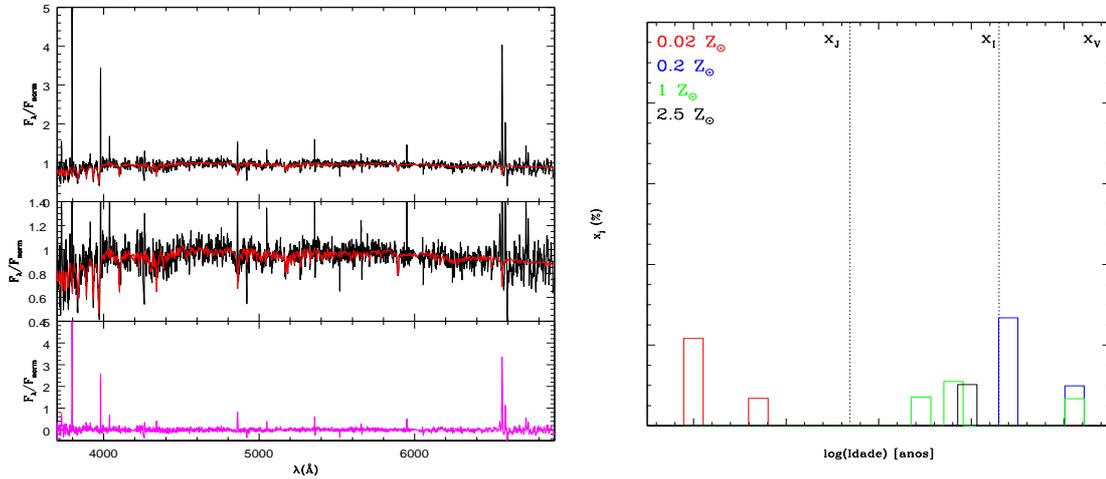


Figura B.8: Resultado da síntese para a abertura i do PA=125°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

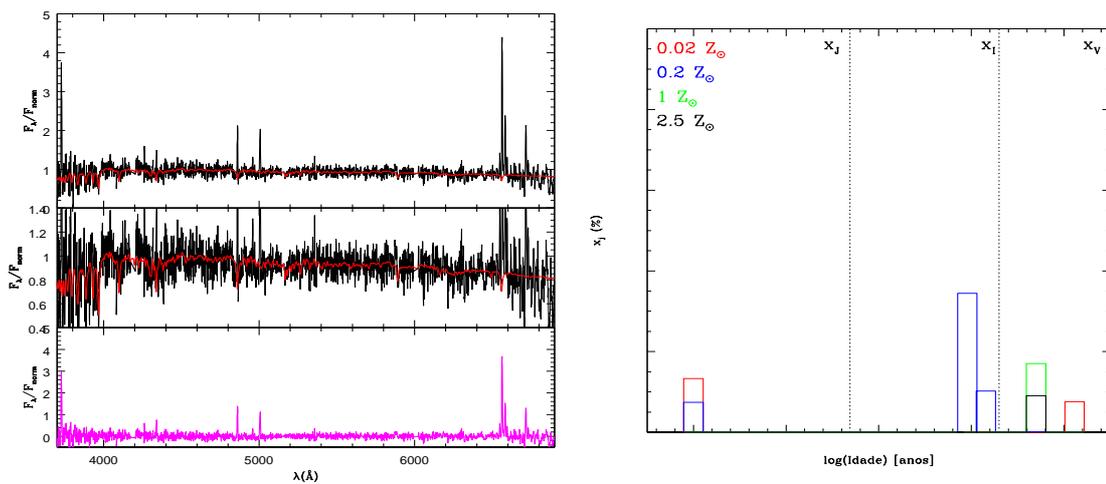


Figura B.9: Resultado da síntese para a abertura l do PA=125°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

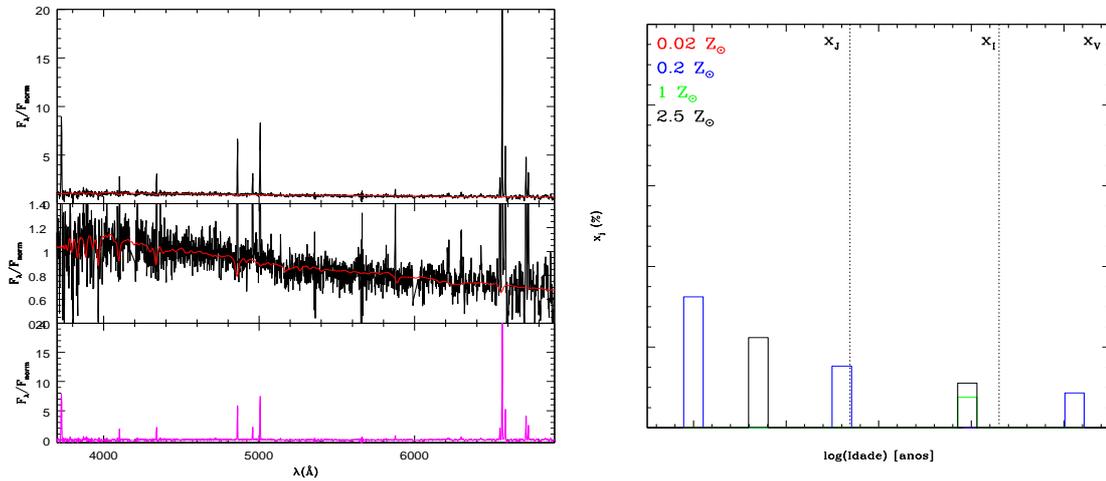


Figura B.10: Resultado da síntese para a abertura m do PA=125°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

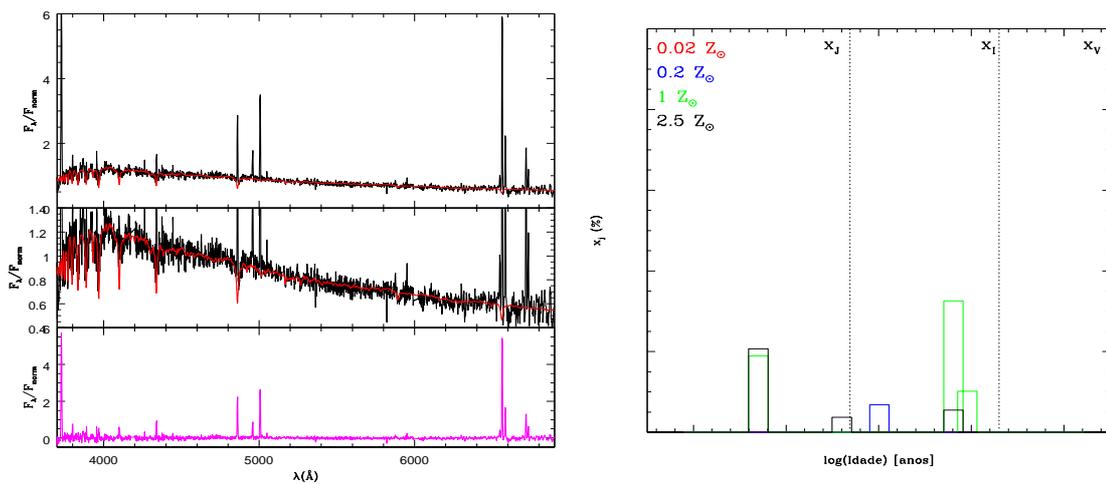


Figura B.11: Resultado da síntese para a abertura o do PA=125°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

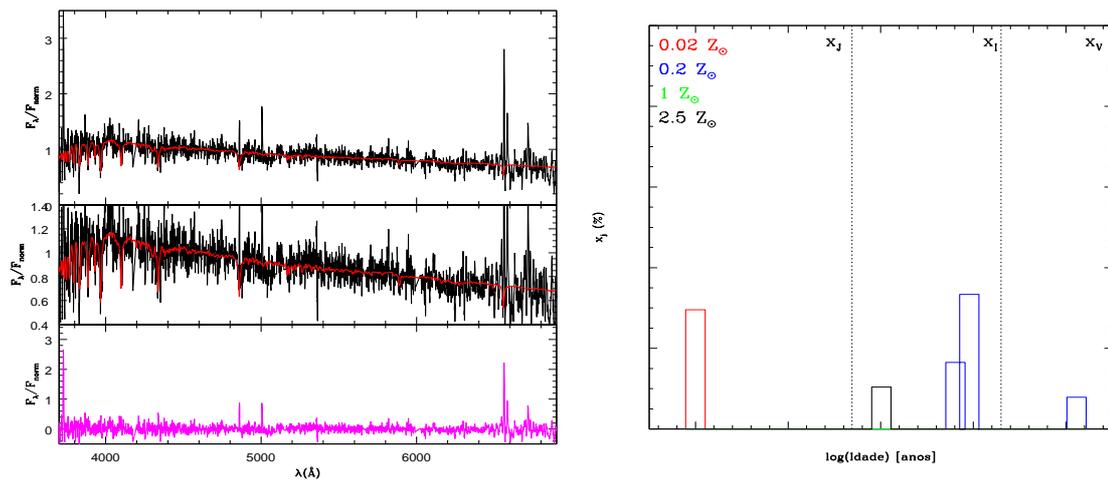


Figura B.12: Resultado da síntese para a abertura p do PA=125°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

Apêndice C

Resultados individuais da síntese para AM2058A: PA=350°

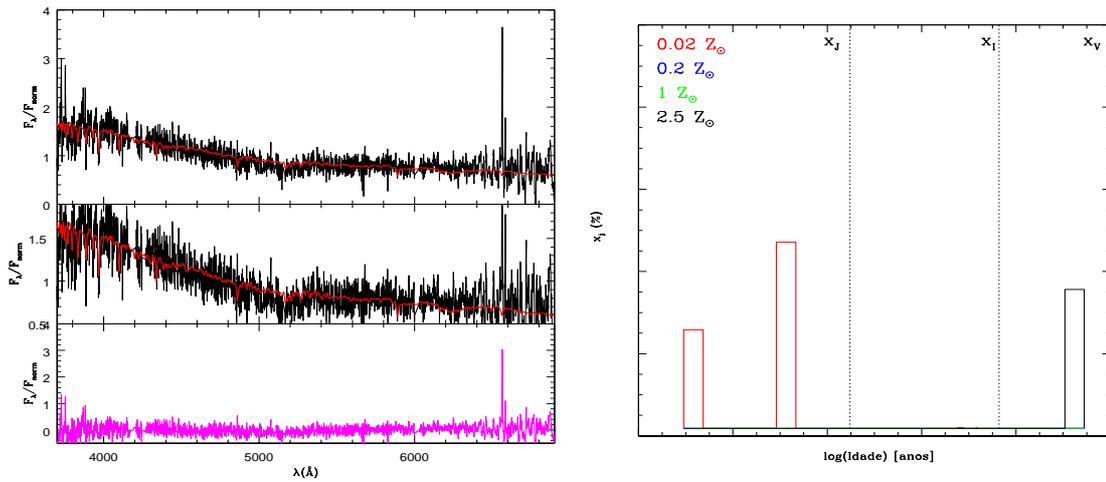


Figura C.1: Resultado da síntese para a abertura a do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

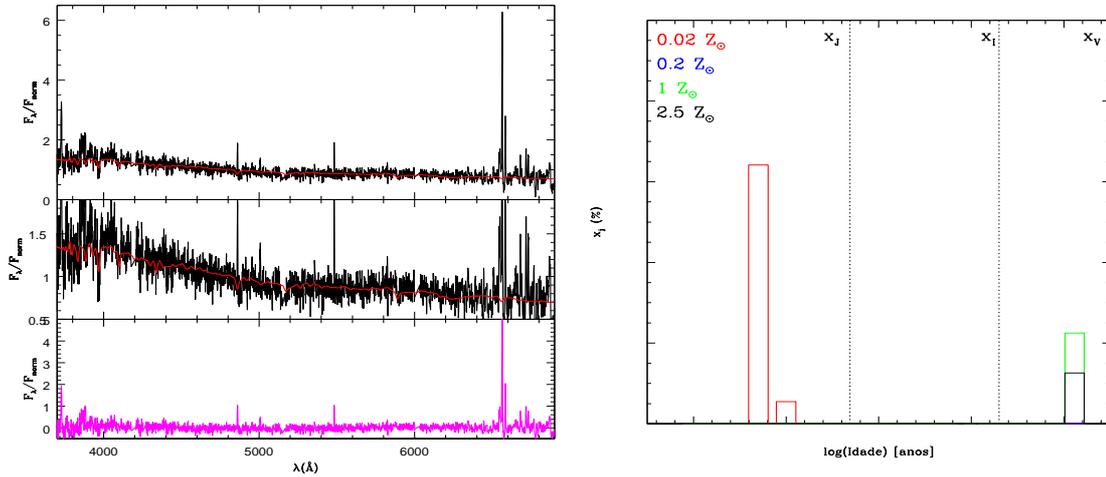


Figura C.2: Resultado da síntese para a abertura b do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

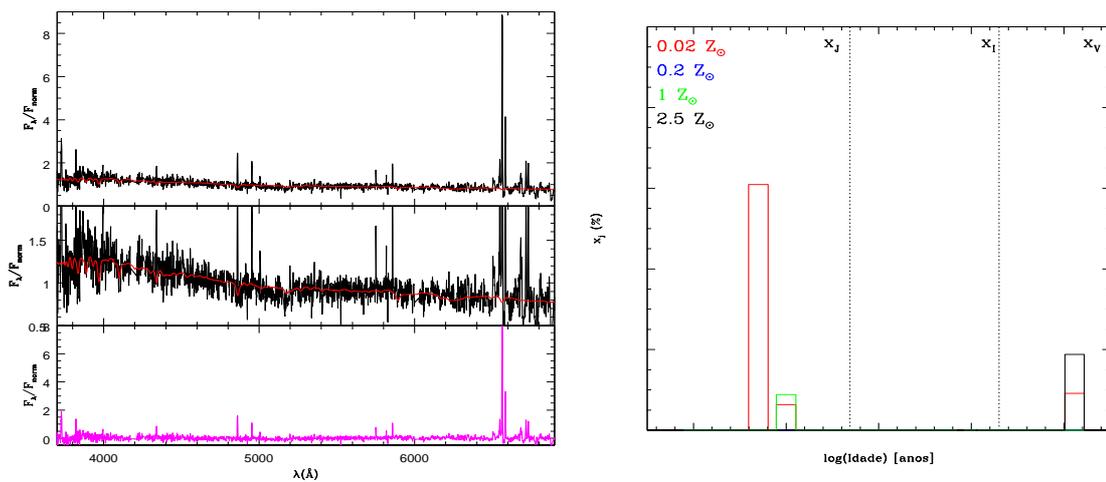


Figura C.3: Resultado da síntese para a abertura c do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

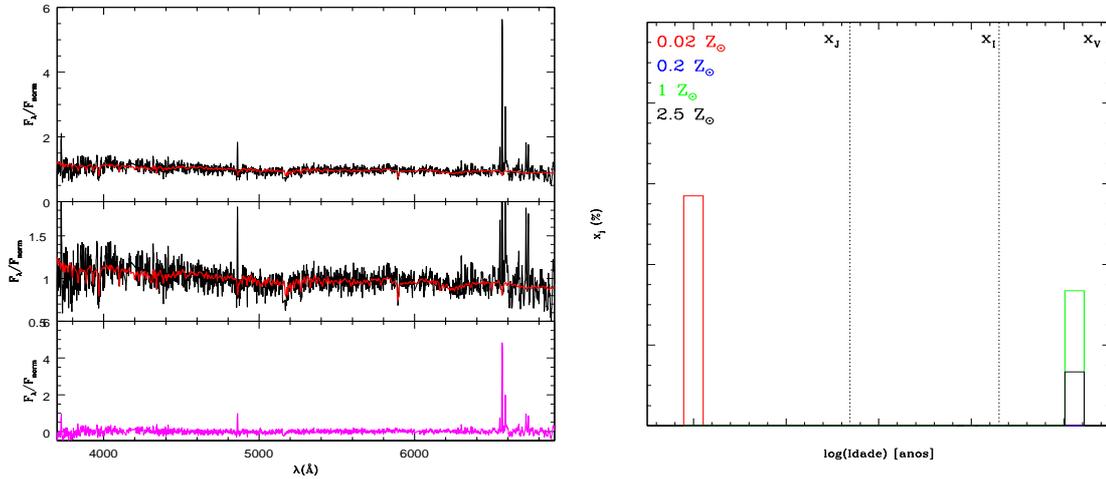


Figura C.4: Resultado da síntese para a abertura e do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

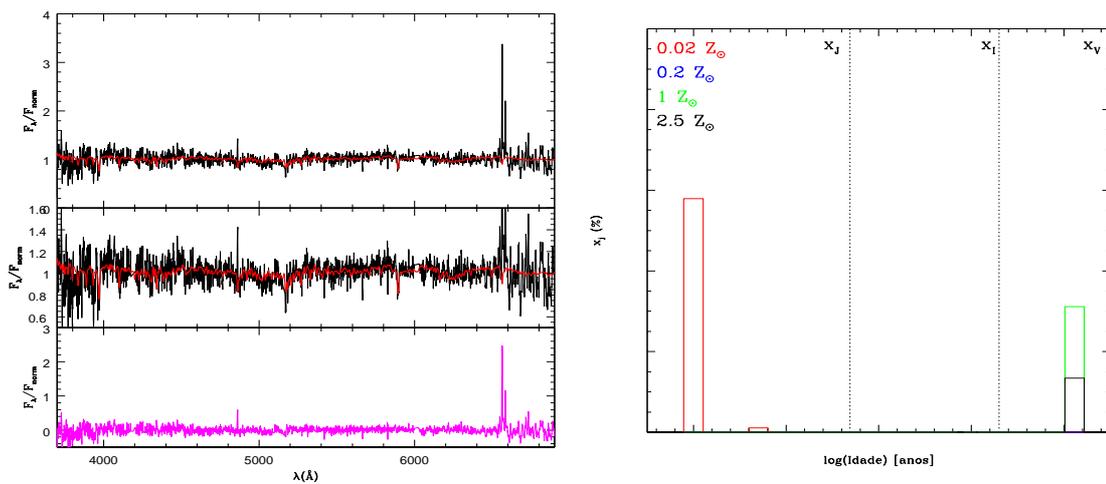


Figura C.5: Resultado da síntese para a abertura f do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

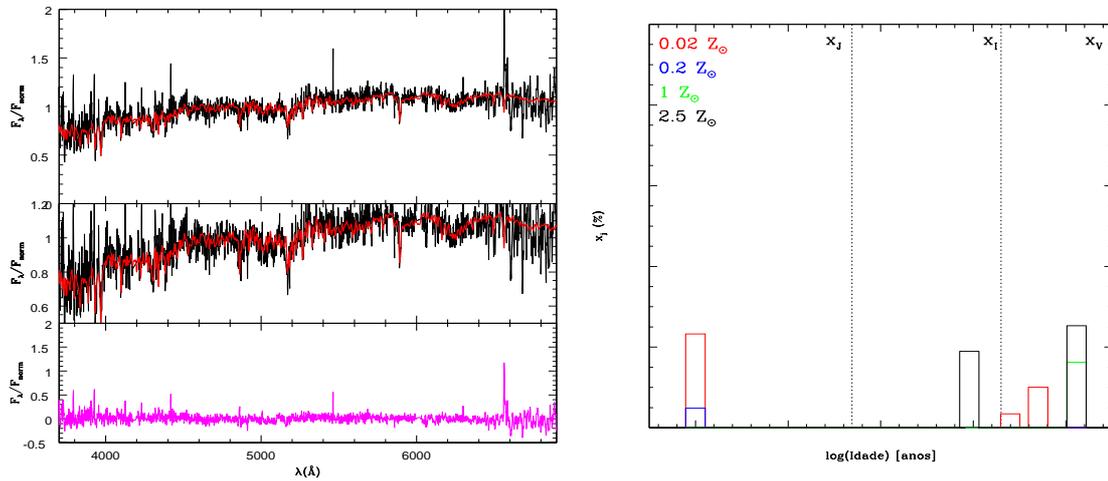


Figura C.6: Resultado da síntese para a abertura g do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

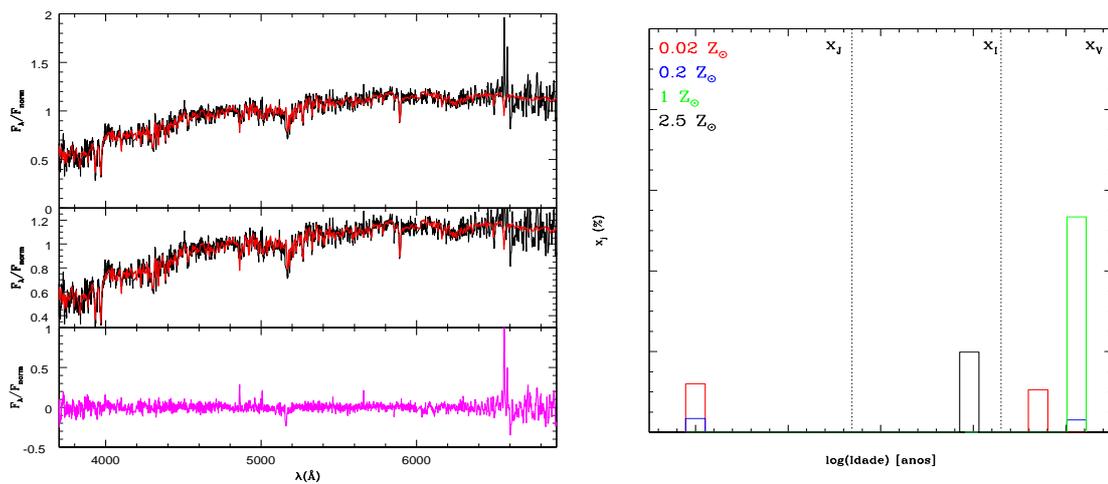


Figura C.7: Resultado da síntese para a abertura h do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

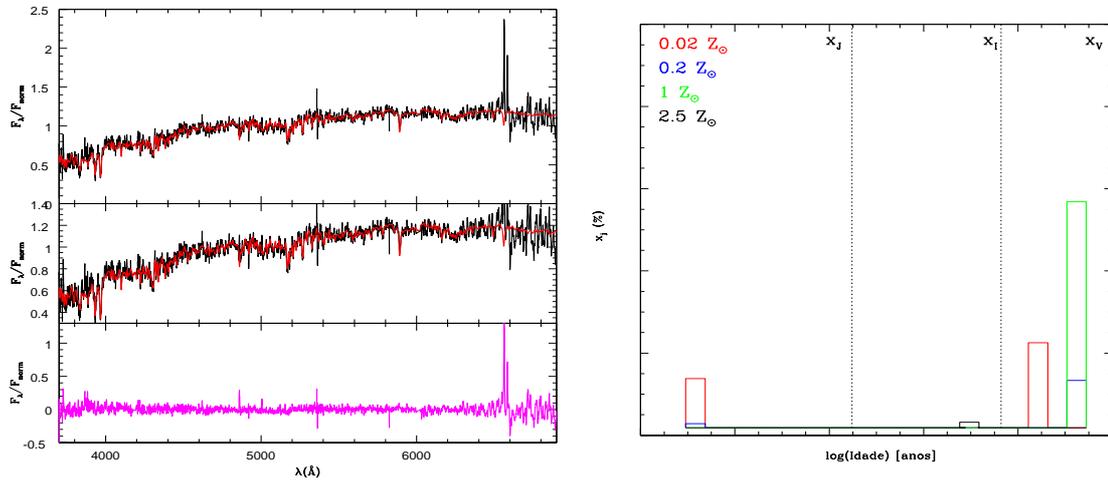


Figura C.8: Resultado da síntese para a abertura j do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

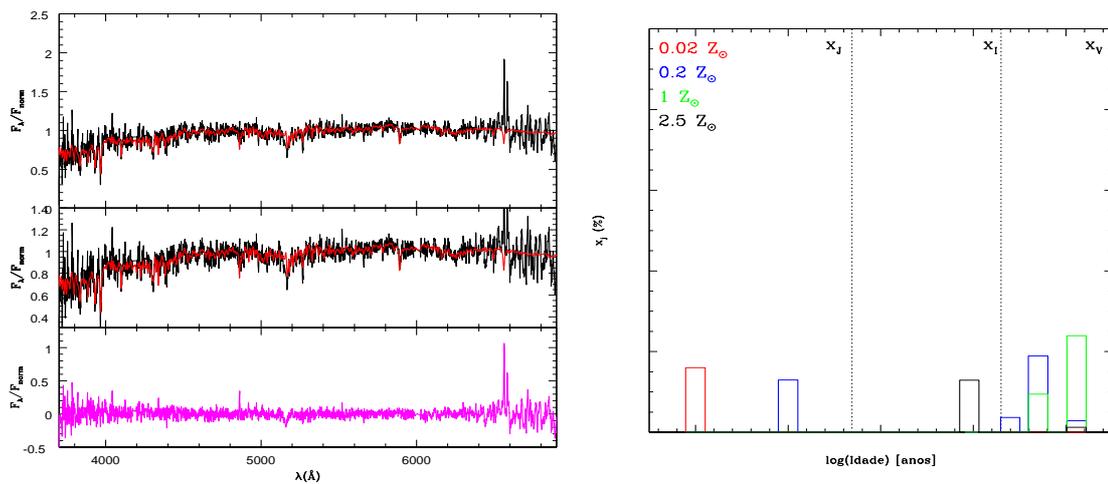


Figura C.9: Resultado da síntese para a abertura k do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

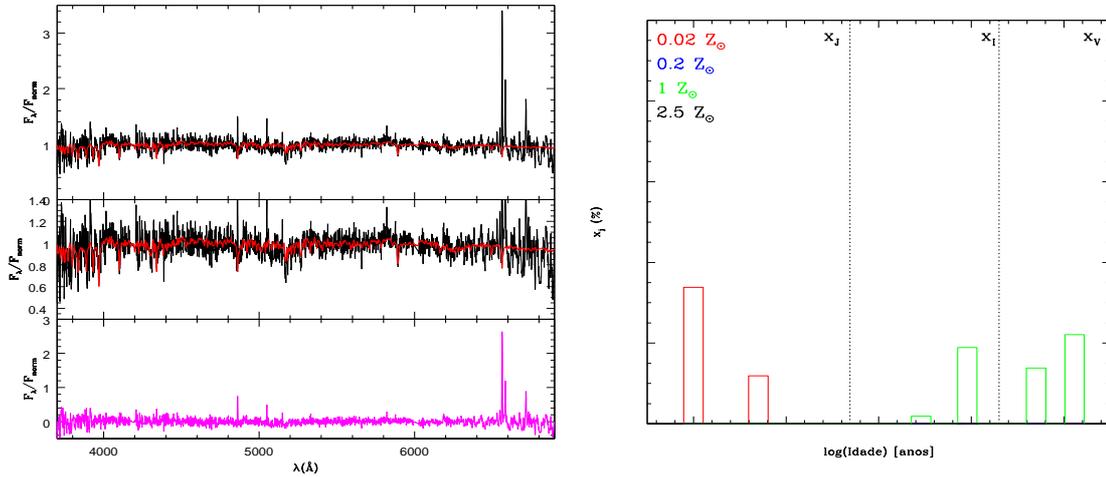


Figura C.10: Resultado da síntese para a abertura l do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

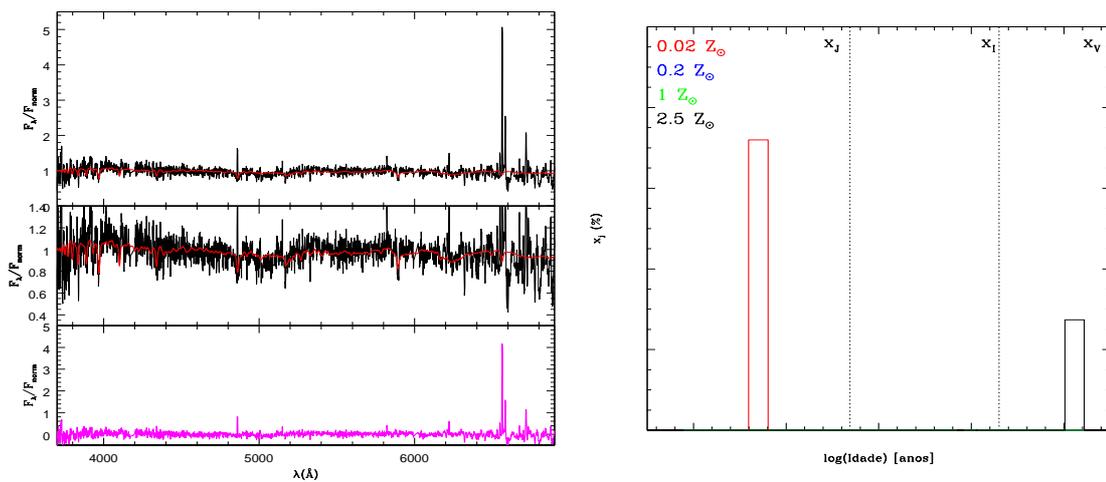


Figura C.11: Resultado da síntese para a abertura m do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

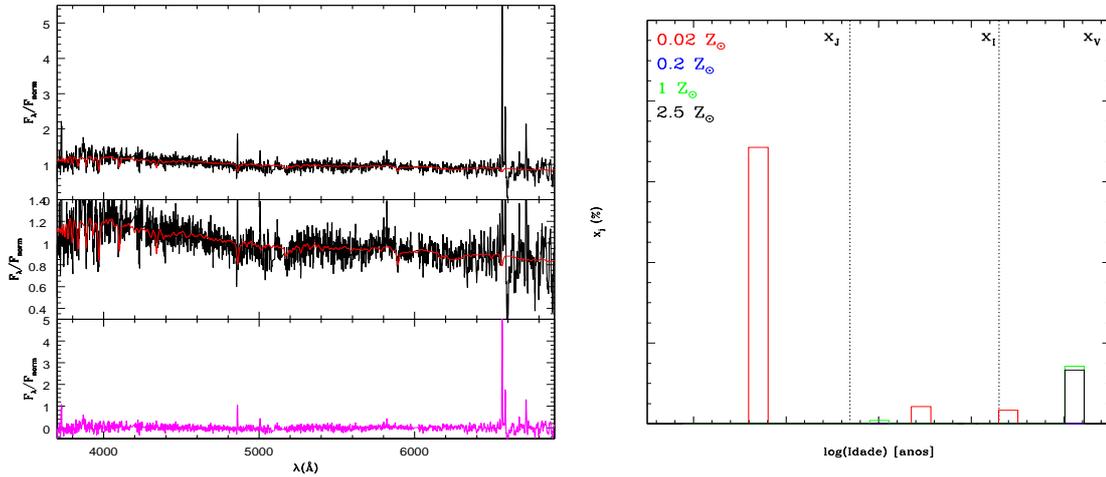


Figura C.12: Resultado da síntese para a abertura n do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

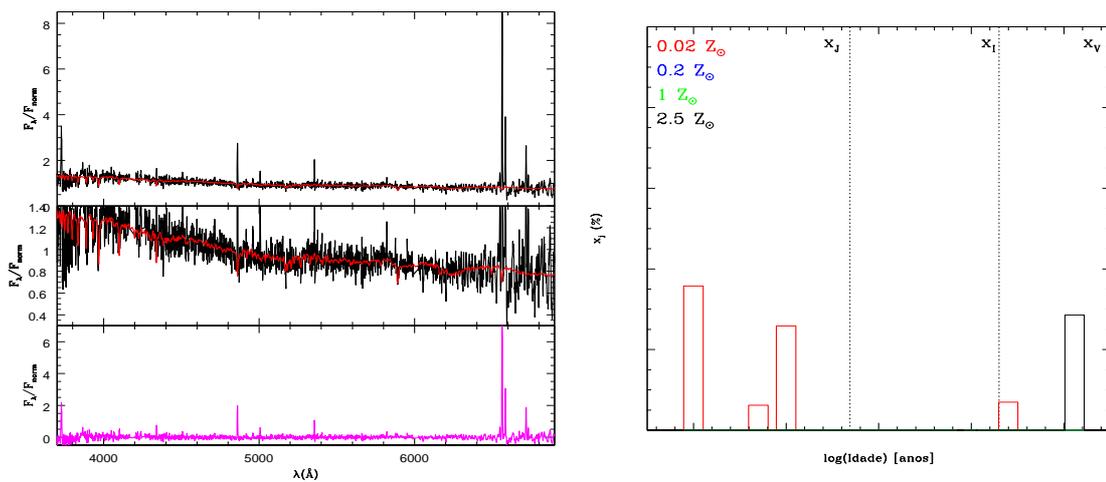


Figura C.13: Resultado da síntese para a abertura o do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

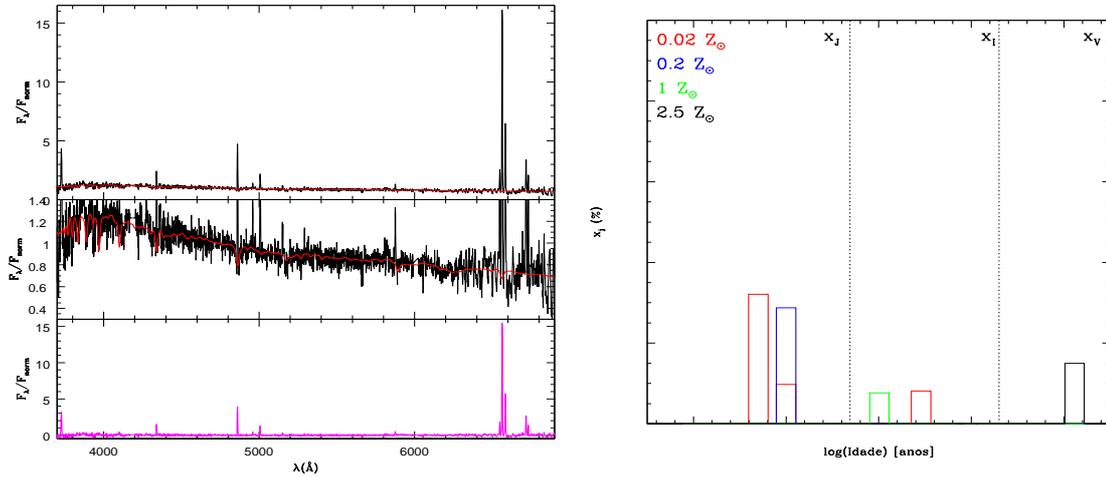


Figura C.14: Resultado da síntese para a abertura p do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

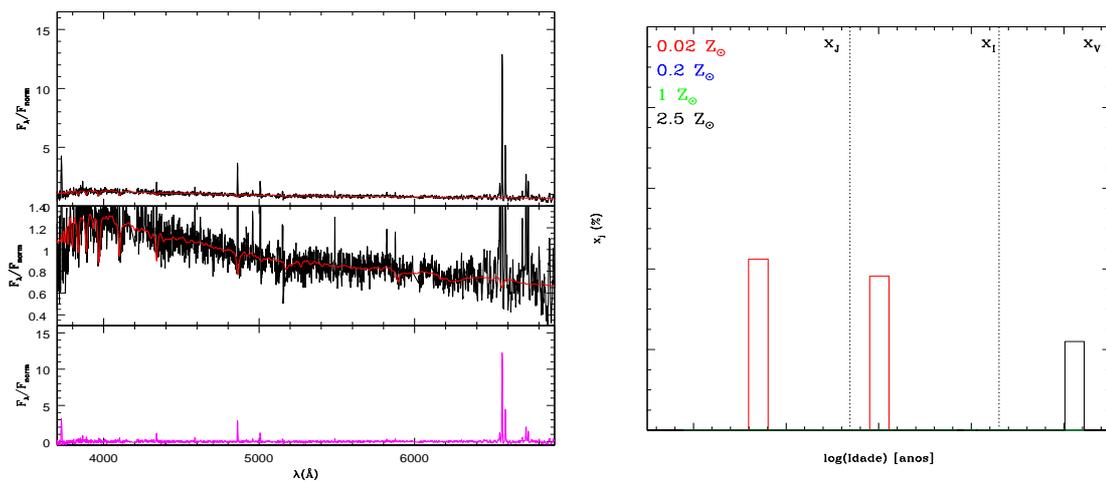


Figura C.15: Resultado da síntese para a abertura q do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

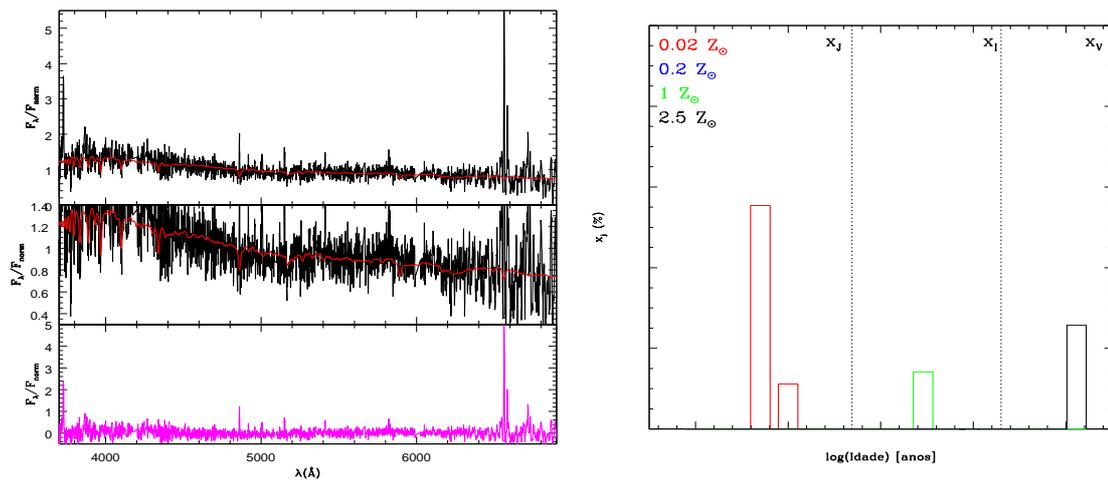


Figura C.16: Resultado da síntese para a abertura r do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

Apêndice D

Resultados individuais da síntese para AM2058B: PA=94° e PA=350°

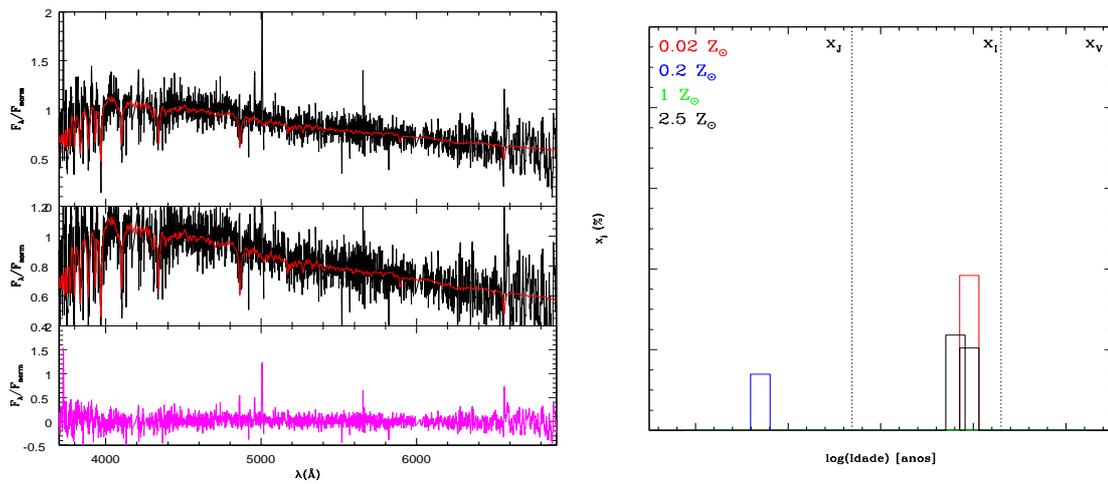


Figura D.1: Resultado da síntese para a abertura a do PA=94°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

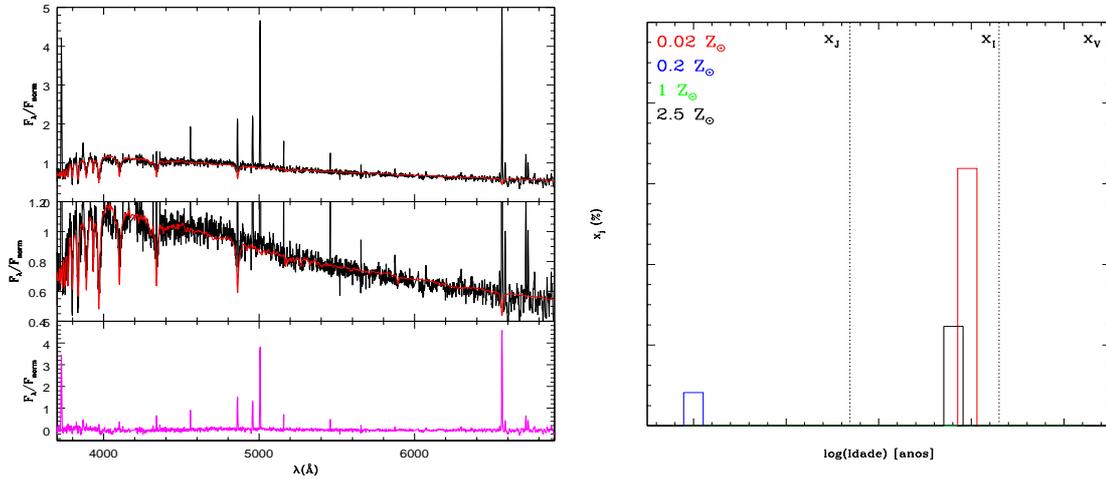


Figura D.2: Resultado da síntese para a abertura c do PA=94°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

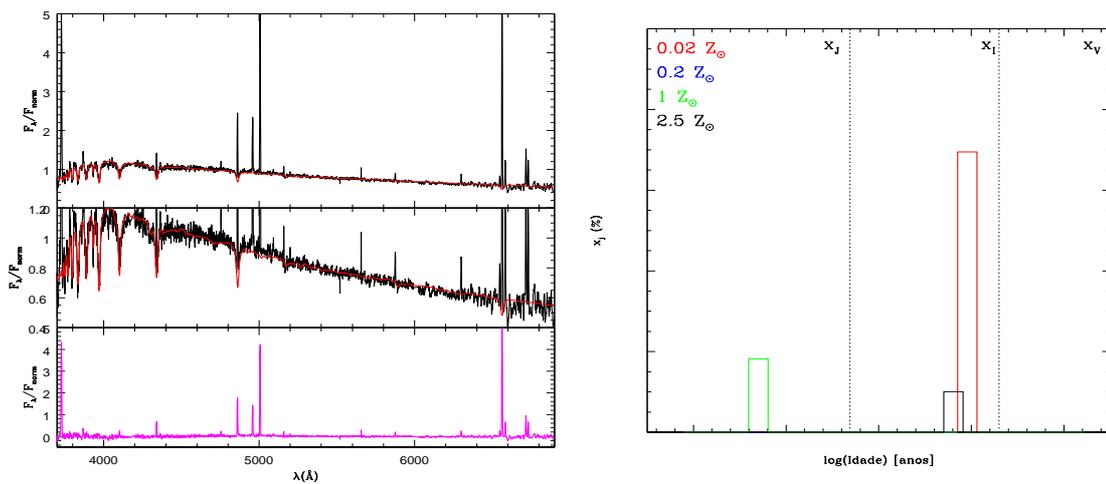


Figura D.3: Resultado da síntese para a abertura d do PA=94°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

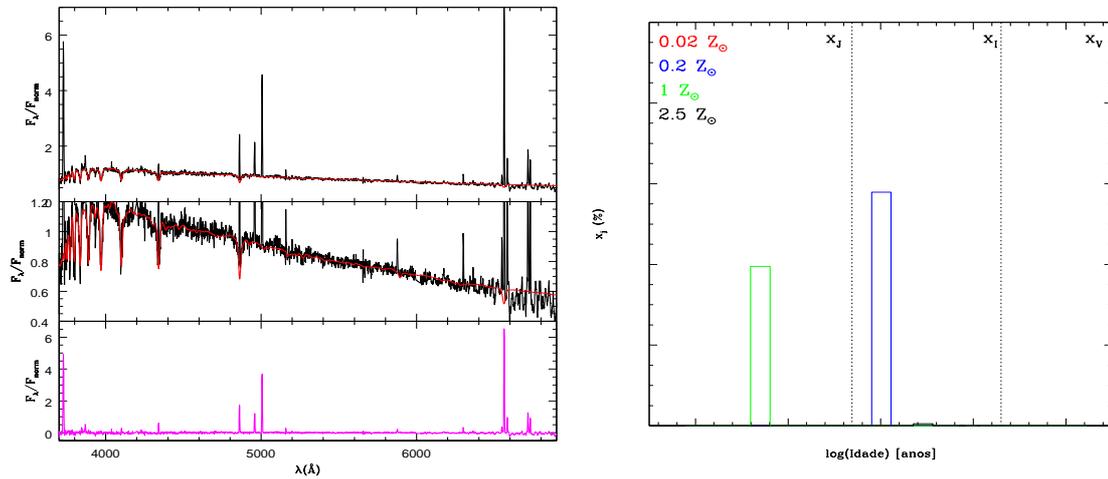


Figura D.4: Resultado da síntese para a abertura f do PA=94°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

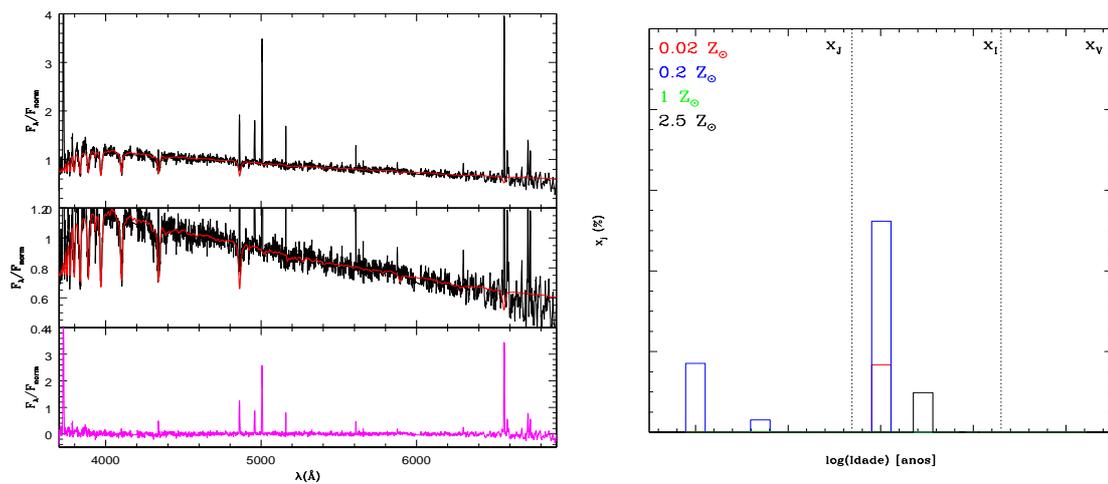


Figura D.5: Resultado da síntese para a abertura g do PA=94°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

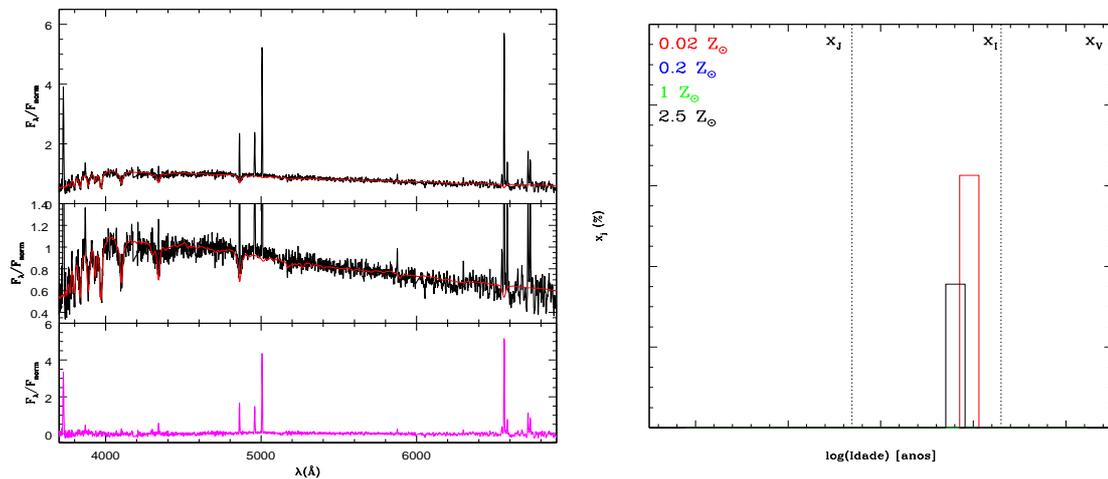


Figura D.6: Resultado da síntese para a abertura a do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

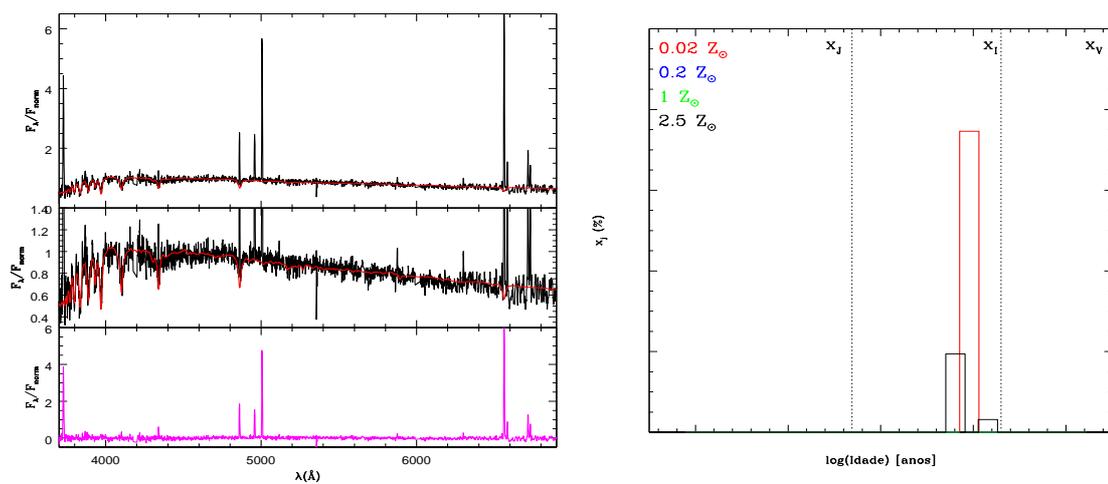


Figura D.7: Resultado da síntese para a abertura c do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

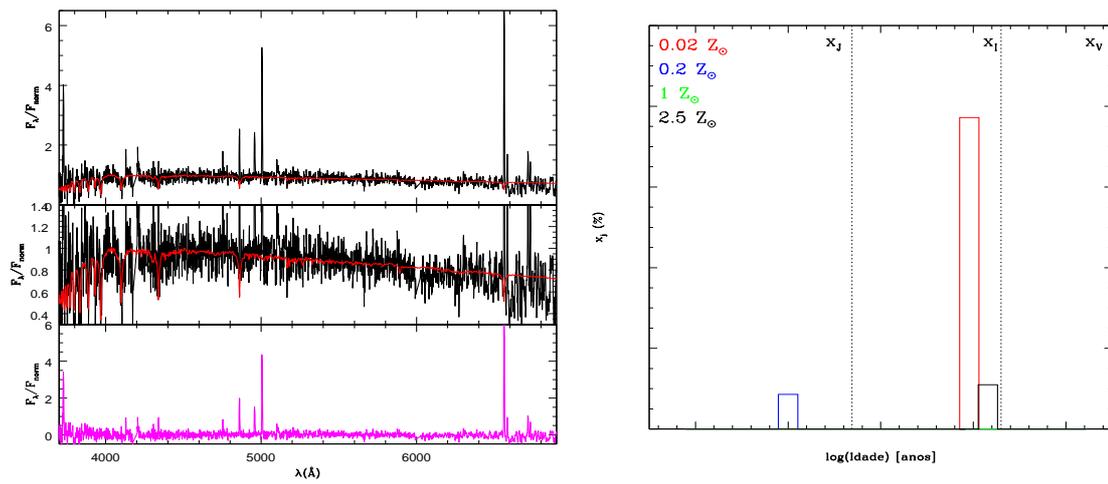


Figura D.8: Resultado da síntese para a abertura d do PA=350°: Descrição das figuras ver Fig. 5.2

Referências Bibliográficas

- [1] ARP, H. C., MADORE, B. F. **A Catalogue of Southern Peculiar Galaxies and Associations 2 volume set**: May 1987.
- [2] ASARI, N. V., CID FERNANDES, R., STASIŃSKA, G., TORRES-PAPAQUI, J. P., MATEUS, A., SODRÉ, L., SCHOENELL, W., GOMES, J. M. The history of star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 381, p. 263–279, October 2007.
- [3] BAADE, W. The Resolution of Messier 32, NGC 205, and the Central Region of the Andromeda Nebula. **Astrophysical Journal**, v. 100, p. 137–+, September 1944.
- [4] BABCOCK, H. W. The rotation of the Andromeda Nebula. **Lick Observatory Bulletin**, v. 19, p. 41–51, 1939.
- [5] BARNES, J. E., HERNQUIST, L. Dynamics of interacting galaxies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 30, p. 705–742, 1992.
- [6] BARNES, J. E., HERNQUIST, L. E. Fueling starburst galaxies with gas-rich mergers. **Astrophysical Journal Letters**, v. 370, p. L65–L68, April 1991.
- [7] BERTOLA, F., BETTONI, D., DANZIGER, J., SADLER, E., SPARKE, L., DE ZEEUW, T. Testing the gravitational field in elliptical galaxies - NGC 5077. **Astrophysical Journal**, v. 373, p. 369–390, June 1991.
- [8] BINNEY, J., TREMAINE, S. **Galactic dynamics**: 1987.
- [9] BOURNAUD, F. Star Formation and Structure Formation in Galaxy Interactions and Mergers. In: GALAXY WARS: STELLAR POPULATIONS AND STAR FORMATION IN INTERACTING GALAXIES, B. Smith, J. Higdon, S. Higdon, & N. Bastian, , editor, v. 423 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**, p. 177–+, June 2010.

- [10] BOURNAUD, F., DUC, P.-A., AMRAM, P., COMBES, F., GACH, J.-L. Kinematics of tidal tails in interacting galaxies: Tidal dwarf galaxies and projection effects. **Astronomy and Astrophysics**, v. 425, p. 813–823, October 2004.
- [11] BOURNAUD, F., POWELL, L. C., CHAPON, D., TEYSSIER, R. Star formation in galaxy mergers: ISM turbulence, dense gas excess, and scaling relations for disks and starbursts. **ArXiv e-prints**, December 2010.
- [12] BRUZUAL, G., CHARLOT, S. Stellar population synthesis at the resolution of 2003. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 344, p. 1000–1028, October 2003.
- [13] CARDELLI, J. A., CLAYTON, G. C., MATHIS, J. S. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction. **Astrophysical Journal**, v. 345, p. 245–256, October 1989.
- [14] CARLBERG, R. G., COUCHMAN, H. M. P. Mergers and bias in a cold dark matter cosmology. **Astrophysical Journal**, v. 340, p. 47–68, May 1989.
- [15] CHANDRASEKHAR, S. Dynamical Friction. I. General Considerations: the Coefficient of Dynamical Friction. **Astrophysical Journal**, v. 97, p. 255–+, March 1943.
- [16] CID FERNANDES, R., GU, Q., MELNICK, J., TERLEVICH, E., TERLEVICH, R., KUNTH, D., RODRIGUES LACERDA, R., JOGUET, B. The star formation history of Seyfert 2 nuclei. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 355, p. 273–296, November 2004.
- [17] CID FERNANDES, R., MATEUS, A., SODRÉ, L., STASIŃSKA, G., GOMES, J. M. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 358, p. 363–378, April 2005.
- [18] CID FERNANDES, R., SCHOENELL, W., GOMES, J. M., ASARI, N. V., SCHLICKMANN, M., MATEUS, A., STASINSKA, G., SODRÉ, L., JR., TORRES-PAPAQUI, J. P. The Star Formation Histories of Galaxies: A tour through the STARLIGHT-SDSS database. In: REVISTA MEXICANA DE ASTRONOMIA Y ASTROFISICA CONFERENCE SERIES, v. 35 of **Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series**, p. 127–132, May 2009.

- [19] DONZELLI, C. J., PASTORIZA, M. G. Optical Spectroscopic Properties of a Sample of Interacting Galaxies. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 111, p. 181–+, July 1997.
- [20] DRESSLER, A. The Evolution of Galaxies in Clusters. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 22, p. 185–222, 1984.
- [21] DUC, P.-A., MIRABEL, I. F. Recycled galaxies in the colliding system ARP 105. **Astronomy and Astrophysics**, v. 289, p. 83–93, September 1994.
- [22] DUC, P.-A., MIRABEL, I. F. Tidal dwarf galaxies. **The Messenger**, v. 89, p. 14–18, September 1997.
- [23] DUC, P.-A., MIRABEL, I. F. Young tidal dwarf galaxies around the gas-rich disturbed lenticular NGC 5291. **Astronomy and Astrophysics**, v. 333, p. 813–826, May 1998.
- [24] ELMEGREEN, D. M. **Galaxies and galactic structure: 1998**.
- [25] FERREIRO, D. L., PASTORIZA, M. G. Sample of minor merger of galaxies: Optical CCD surface photometry and HII region properties. **Astronomy and Astrophysics**, v. 428, p. 837–846, December 2004.
- [26] FERREIRO, D. L., PASTORIZA, M. G., RICKES, M. Sample of minor merger of galaxies. II. Modelling HII region properties. **Astronomy and Astrophysics**, v. 481, p. 645–649, April 2008.
- [27] FREEDMAN WOODS, D., GELLER, M. J., KURTZ, M. J., WESTRA, E., FABRICANT, D. G., DELL'ANTONIO, I. Triggered Star Formation in Galaxy Pairs at $z = 0.08-0.38$. **Astronomical Journal**, v. 139, p. 1857–1870, May 2010.
- [28] FRENK, C. S., WHITE, S. D. M., DAVIS, M., EFSTATHIOU, G. The formation of dark halos in a universe dominated by cold dark matter. **Astrophysical Journal**, v. 327, p. 507–525, April 1988.
- [29] HERNQUIST, L., MIHOS, J. C. Excitation of Activity in Galaxies by Minor Mergers. **Astrophysical Journal**, v. 448, p. 41–+, July 1995.
- [30] HIBBARD, J. E., BIANCHI, L., THILKER, D. A., RICH, R. M., SCHIMINOVICH, D., XU, C. K., NEFF, S. G., SEIBERT, M., LAUGER, S., BURGARELLA, D., BARLOW, T. A., BYUN, Y.-I., DONAS, J., FORSTER, K.,

- FRIEDMAN, P. G., HECKMAN, T. M., JELINSKY, P. N., LEE, Y.-W., MADORE, B. F., MALINA, R. F., MARTIN, D. C., MILLIARD, B., MORRISSEY, P., SIEGMUND, O. H. W., SMALL, T., SZALAY, A. S., WELSH, B. Y., WYDER, T. K. Ultraviolet Morphology and Star Formation in the Tidal Tails of NGC 4038/39. **Astrophysical Journal Letters**, v. 619, p. L87–L90, January 2005.
- [31] HUBBLE, E. A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae. **Proceedings of the National Academy of Science**, v. 15, p. 168–173, March 1929.
- [32] HUBBLE, E. Red-shifts and the distribution of nebulae. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 97, p. 506–+, May 1937.
- [33] KORMENDY, J., RICHSTONE, D. Inward Bound—The Search For Supermassive Black Holes In Galactic Nuclei. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 33, p. 581–+, 1995.
- [34] KRABBE, A. C., PASTORIZA, M. G., WINGE, C., RODRIGUES, I., FERREIRO, D. L. Kinematics and physical properties of southern interacting galaxies: the minor merger AM2306-721. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 389, p. 1593–1604, October 2008.
- [35] KRABBE, A.C., PASTORIZA, M.G., WINGE, C., RODRIGUES, I., FERREIRO, D.L., DORS, O.L. The effects of the interaction on the kinematics and metallicity of the interacting galaxies AM2022-821. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, May 2011.
- [36] KRONBERGER, T., KAPFERER, W., SCHINDLER, S., BÖHM, A., KUTDEMIR, E., ZIEGLER, B. L. Internal kinematics of modelled interacting disc galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 458, p. 69–78, October 2006.
- [37] LE BORGNE, J.-F., BRUZUAL, G., PELLÓ, R., LANÇON, A., ROCCAVOLMERANGE, B., SANAHUJA, B., SCHAEERER, D., SOUBIRAN, C., VÍLCHEZ-GÓMEZ, R. STELIB: A library of stellar spectra at $R \sim 2000$. **Astronomy and Astrophysics**, v. 402, p. 433–442, May 2003.
- [38] MATEUS, A., SODRÉ, L., CID FERNANDES, R., STASIŃSKA, G., SCHOENELL, W., GOMES, J. M. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - II. The bimodality of the galaxy population revisited. **Monthly**

Notices of the Royal Astronomical Society, v. 370, p. 721–737, August 2006.

- [39] PAGEL, B. E. J., EDMUNDS, M. G., BLACKWELL, D. E., CHUN, M. S., SMITH, G. On the composition of H II regions in southern galaxies. I - NGC 300 and 1365. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 189, p. 95–113, October 1979.
- [40] PASTORIZA, M. G., DONZELLI, C. J., BONATTO, C. Nuclear activity and stellar population of a sample of interacting galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 347, p. 55–62, July 1999.
- [41] PEREZ, J., MICHEL-DANSAC, L., TISSERA, P. Chemical evolution during gas-rich galaxy interactions. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 2011.
- [42] RESHETNIKOV, V. P., KLIMANOV, S. A. The Structure and Evolution of M51-Type Galaxies. **Astronomy Letters**, v. 29, p. 429–436, July 2003.
- [43] ROBERTS, M. S., HAYNES, M. P. Physical Parameters along the Hubble Sequence. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 32, p. 115–152, 1994.
- [44] RUBIN, V. C., FORD, W. K., JR. Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions. **Astrophysical Journal**, v. 159, p. 379–+, February 1970.
- [45] SALPETER, E. E. The Luminosity Function and Stellar Evolution. **Astrophysical Journal**, v. 121, p. 161–+, January 1955.
- [46] SCHNEIDER, P., . **Extragalactic Astronomy and Cosmology**: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [47] SCHWARZKOPF, U., DETTMAR, R.-J. The influence of interactions and minor mergers on the structure of galactic disks. II. Results and interpretations. **Astronomy and Astrophysics**, v. 361, p. 451–464, September 2000.
- [48] SCHWEIZER, F. Galaxies with long tails. In: STRUCTURE AND PROPERTIES OF NEARBY GALAXIES, E. M. Berkhuijsen & R. Wielebinski, , editor, v. 77 of **IAU Symposium**, p. 279–284, 1978.

- [49] STORCHI-BERGMANN, T., RODRIGUEZ-ARDILA, A., SCHMITT, H. R., WILSON, A. S., BALDWIN, J. A. Circumnuclear Star Formation in Active Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 472, p. 83–+, November 1996.
- [50] STRUCK, C. Galaxy collisions. , v. 321, p. 1–137, 1999.
- [51] TEMPORIN, S., WEINBERGER, R., GALAZ, G., KERBER, F. Candidate Tidal Dwarf Galaxies in the Compact Group CG J1720-67.8. **Astrophysical Journal**, v. 587, p. 660–671, April 2003.
- [52] TOOMRE, A., TOOMRE, J. Galactic Bridges and Tails. **Astrophysical Journal**, v. 178, p. 623–666, December 1972.
- [53] VIEGAS, S.M. M., OLIVEIRA, F. **Descobrimdo o Universo**: Editora da Universidade de São Paulo-EDUSP, 2004.
- [54] WHITMORE, B. C., LUCAS, R. A., MCELROY, D. B., STEIMAN-CAMERON, T. Y., SACKETT, P. D., OLLING, R. P. New observations and a photographic atlas of polar-ring galaxies. **Astronomical Journal**, v. 100, p. 1489–1522, November 1990.
- [55] ZWICKY, F. Multiple Galaxies. **Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften**, v. 29, p. 344–385, 1956.