

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-8003-TDI/751

**OBSERVAÇÃO DA TEMPERATURA ROTACIONAL DA
HIDROXILA ATRAVÉS DA AEROLUMINESCÊNCIA NA REGIÃO
DA MESOSFERA TERRESTRE**

Cristiano Max Wrasse

Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, orientada pelo Dr. Hisao
Takahashi, aprovada em 28 de fevereiro de 2000.

INPE
São José dos Campos
2000

520. 82

WRASSE, C. M.

Observação da temperatura rotacional da hidroxila através da aeroluminescência na região da mesosfera terrestre / C. M. Wrasse - São José dos Campos: INPE, 2000.

125p. - (INPE-8003-TDI/751).

1.Aeroluminescência. 2.Mesosfera. 3.Temperatura. 4.Hidroxila. 5.Probabilidades de transição. I. Título.

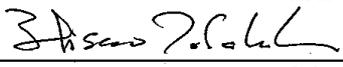
Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Mestre em Geofísica Espacial.**

Dr^a Maria Virginia Alves



Presidente

Dr. Hisao Takahashi



Orientador

Dr. Delano Gobbi



Membro da Banca

Dr^a Inez Staciarini Batista



Membro da Banca

Dr. Ricardo Arlen Buriti



Membro da Banca
Convidado

Candidato (a) : Cristiano Max Wrasse

São José dos Campos, 28 de fevereiro de 2000.

AGRADECIMENTOS

A meus pais e demais familiares pelo apoio e constante incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao Dr. Hisao Takahashi pela oportunidade de trabalho e sua dedicação na orientação desta Dissertação de Mestrado.

Aos engenheiros Agnaldo Eras, Narli Baesso e ao técnico Alan Braga pelo desenvolvimento, montagem e suporte técnico dado ao fotômetro portátil.

À Primavera Botelho de Souza por sua ajuda no desenvolvimento dos programas. Aos demais profissionais dos laboratórios Laser e LUME do INPE que de algum modo contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Dr. Nelson Jorge Schuch pela indicação no Curso de Mestrado do INPE, pelo apoio, orientação pessoal e profissional durante todo curso.

À minha namorada e professora de Letras, Karin Brauer por sua dedicação e compreensão em todas as etapas deste trabalho e pela correção ortográfica do texto.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida.

A todos os meus colegas de curso e amigos pelo companheirismo, apoio e pelas críticas na realização deste trabalho.

RESUMO

O Laboratório de Luminescência Atmosférica (LUME) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolveu um fotômetro portátil com filtro de interferência inclinável para medir a aeroluminescência terrestre da hidroxila, banda OH(8,3). Um programa de computador foi desenvolvido para controlar o funcionamento do equipamento e realizar a aquisição e redução dos dados. Realizou-se o processo de calibração espectral e de sensibilidade absoluta no laboratório LUME/INPE para definir o filtro de interferência utilizado e as linhas de emissões da OH(8,3) medidas. Após estas etapas, realizaram-se as observações da aeroluminescência atmosférica no laboratório LUME do Centro Espacial de Cachoeira Paulista – INPE, onde foram obtidas as intensidades médias de emissão de 358 Rayleigh e a temperatura rotacional média de 210 Kelvin da banda OH(8,3). A partir dos resultados das observações feitas durante os meses de agosto a novembro de 1999, determinaram-se as temperaturas rotacionais da OH(8,3), comparando as temperaturas obtidas para vários coeficientes de Einstein existentes na literatura. A temperatura da OH(8,3) determinada utilizando os coeficientes obtidos por Langhoff et al. (1986) mostrou a melhor concordância com a temperatura da OH(6,2) obtida usando os coeficientes de Mies (1974).

AIRGLOW OBSERVATIONS OF THE HYDROXIL'S ROTATIONAL TEMPERATURE AT THE TERRESTRIAL MESOSPHERIC REGION

ABSTRACT

The Atmospheric Airglow Laboratory (LUME) of National Institute for Space Research (INPE) developed a portable photometer with a tilting filter to measure the OH(8,3) band airglow. A computer program was developed to control the photometer operation and to accomplish the acquisition and reduction of the data. Photometer sensitivity and spectral calibrations were carried out in order to determine the OH(8,3) line intensities. After these steps, the airglow observations were carried out at the LUME airglow observatory at the Space Center of Cachoeira Paulista - INPE. With the results obtained during the months of August to November in 1999, the estimations of the rotational temperatures of OH(8,3) were carried out. An averaged OH(8,3) band intensity during the period was 358 Rayleigh, and the rotational temperature was 210 Kelvin. It is found that the OH(8,3) temperature obtained with the transition coefficient of Langhoff et al. (1986) has better agreement with the OH(6,2) temperature obtained using Mies' (1974) transition probability.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Objetivo Geral	13
1.1.1 Objetivos Específicos	13
1.2 Estrutura da Dissertação.....	14
CAPÍTULO 2 - CONHECIMENTOS BÁSICOS.....	17
2.1 A Atmosfera Terrestre	17
2.2 Medidas da Temperatura Atmosférica na Região na Mesopausa Terrestre.....	22
2.2.1 O Perfil da Temperatura Atmosférica Terrestre.....	22
2.2.2 Histórico sobre as Medidas de Temperatura na Mesopausa através do Espectro da OH	26
2.3 A Molécula da Hidroxila - OH	30
2.3.1 Energia da Molécula.....	31
2.3.1.1 Energia Eletrônica	32
2.3.1.2 Energia Vibracional	35
2.3.1.3 Energia Rotacional	35
2.3.2 A Intensidade das Linhas Vibracionais-Rotacionais da OH.....	39
2.3.2.1 Os coeficientes de Einstein	41
2.3.3 Temperatura Rotacional da OH.....	43
2.3.4 Fotoquímica da OH	45
CAPÍTULO 3 - INSTRUMENTAÇÃO E REDUÇÃO DE DADOS.....	49
3.1 O Fotômetro Portátil.....	49
3.1.1 Calibração do Fotômetro Portátil.....	54
3.1.1.1 Transmissão do Filtro	54

3.1.1.2 Sensibilidade Absoluta do Fotômetro	56
3.1.2 Determinação da Temperatura Rotacional da OH(8,3)	61
3.1.3 Determinação da Intensidade de Emissão da OH(8,3)	65
3.1.4 Confiabilidade e Precisão das Medidas	67
3.1.4.1 Erros Associados aos Fatores Experimentais	67
3.1.4.2 Erros Associados aos Fatores Teóricos	68
3.1.4.3 Erros Aleatórios Associados às Medidas de Intensidade e Temperatura.....	68
3.1.5 Programa de Aquisição dos Dados	69
3.2 O Fotômetro Multi2.....	71
CAPÍTULO 4 - OBSERVAÇÕES E RESULTADOS	75
4.1 Coleta de Dados.....	75
4.2 Variações Noturnas da Intensidade e Temperatura da OH(8,3)	79
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	89
5.1 Diferença da Temperatura Rotacional da OH(8,3) entre os Coeficientes de Einstein	89
5.2 Comparação entre as Temperaturas Rotacionais da OH(8,3) e OH(6,2)...	94
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
APÊNDICE A - DETERMINAÇÃO DO ESPECTRO DA OH(8,3)	111
APÊNDICE B - DETERMINAÇÃO DA TAXA DE EMISSÃO VOLUMÉTRICA DA OH(8,3).....	121
APÊNDICE C - ARQUIVOS GERADOS PELOS PROGRAMAS DE AQUISIÇÃO E REDUÇÃO DE DADOS DO FOTÔMETRO PORTÁTIL.....	123

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Na literatura a aeroluminescência é definida como a radiação ótica amorfa continuamente emitida pela atmosfera de um planeta (Chamberlain, 1961). Na Terra, caracteriza-se por ser uma radiação de intensidade relativamente tênue de extensa faixa espectral, do ultravioleta distante ($\sim \lambda$ 250 nm) ao infravermelho ($\sim \lambda$ 4 μ m) (Chamberlain e Hunter, 1987) e cuja origem resulta de transições discretas envolvendo átomos e moléculas excitados pela absorção da radiação solar ou por processos químicos existentes na atmosfera superior terrestre.

Existem três espécies importantes de emissões da aeroluminescência no espectro do visível: 1) as bandas vibracionais rotacionais da hidroxila; 2) as emissões do oxigênio atômico e molecular; 3) as emissões de átomos metálicos, tais como, o sódio, cálcio, potássio e magnésio. A principal fonte de energia para a produção destas emissões da aeroluminescência terrestre é a absorção da radiação solar pelo oxigênio molecular na mesosfera e termosfera, na faixa espectral do ultravioleta (Meriwether, 1989).

As bandas de Meinel, como são caracterizadas as emissões da OH, foram pioneiramente observadas por Meinel (1950a, b). Estas bandas têm servido de base para o estudo de processos fotoquímicos do oxigênio e hidrogênio na mesosfera (McDade e Llewellyn, 1988; Rodrigo et al., 1989; Takahashi et al., 1996) e da dinâmica na região da mesopausa através da observação da variação ondulatória da camada de emissão (Taylor e Hill, 1991; Taylor et al., 1995, 1997; Takahashi et al., 1999).

Com a mudança global da temperatura, a média e alta atmosfera terrestre vem atraindo crescente atenção devido à possível influência antropogênica nas características atmosféricas nestas altitudes. Vários estudos teóricos (Roble e Dickison, 1989; Rind et al., 1990) mostram que o aumento na concentração dos gases do efeito estufa, aumenta a temperatura na superfície terrestre e troposfera e ocasiona um resfriamento da estratosfera e mesosfera (Golitsyn et al., 1996).

A temperatura na região da mesopausa terrestre pode ser medida através da temperatura rotacional de espécies moleculares como a OH e o O₂. Esta temperatura é determinada a partir da intensidade relativa das linhas de emissão do espectro destas moléculas (Sivjee e Hamwey, 1987). Desde seus primeiros trabalhos sobre a emissão da OH, Meinel já discutia a possibilidade de determinar através das intensidades das linhas rotacionais, a temperatura rotacional dessa molécula (Meinel, 1950a, b).

Num esforço para compreender os mecanismos de emissão da OH e os processos de desativação vibracional por colisões, determinam-se também por meio da observação da aeroluminescência, as relativas populações vibracionais desta molécula. Tanto a temperatura como os mecanismos de emissão dependem das probabilidades de transição vibracional e rotacional a serem adotadas, também chamadas de coeficientes de Einstein, (Turnbull e Lowe, 1989).

Uma das principais dificuldades na determinação do fator de remoção colisional da OH excitada ocorre devido às dúvidas em torno dos coeficientes de Einstein a serem adotados para as bandas de Meinel (Melo et al., 1997).

Os coeficientes de Einstein para a molécula OH, existentes na literatura (Murphy, 1971; Mies, 1974; Langhoff et al., 1986; Turnbull e Lowe, 1989; Nelson et al., 1990; e Holtzclaw et al., 1993) apresentam diferenças significantes entre seus coeficientes, o que ocasiona uma diferença de 10 a 15 K na medida da temperatura rotacional. Segundo Nelson et al. (1990) a

temperatura obtida para a transição $v = 3 \rightarrow 2$, por exemplo, dentro do ramo P é:

- 338 K, utilizando os coeficientes de Nelson et al.;
- 337 K, utilizando os coeficientes de Mies;
- 346 K, utilizando os coeficientes de Turnbull e Lowe;
- 331 K, utilizando os coeficientes de Langhoff et al..

Atualmente vem-se desenvolvendo avanço significativo nas modelagens das bandas de Meinel. Novos experimentos em laboratórios estão sendo usados para determinar os coeficiente de Einstein com um maior grau de confiabilidade (Golitsyn et al., 1996).

Desta forma está se obtendo um maior número de medidas observacionais das bandas de Meinel, a fim de investigar e testar novos modelos, melhorando, portanto, nossos conhecimentos sobre os parâmetros cinéticos envolvidos na produção e emissão destas na atmosfera terrestre.

1.1 OBJETIVO GERAL

A presente Dissertação de Mestrado tem com objetivo geral o estudo da temperatura na região da mesopausa, obtida através da observação da aeroluminescência da hidroxila, OH(8,3), utilizando o fotômetro portátil desenvolvido no Laboratório de Luminescência Atmosférica (LUME) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

1.1.1 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral desta dissertação foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- 1) Estudo do espectro de emissão vibracional e rotacional da OH e os processos fotoquímicos relacionados à sua emissão na região da mesopausa terrestre, apresentado no Capítulo 2;
- 2) Desenvolvimento do programa para aquisição e redução dos dados e a realização do processo de calibração do fotômetro portátil, apresentado no Capítulo 3;
- 3) Observação do céu noturno para a determinação do espectro de emissão da OH(8,3) da atmosfera terrestre, utilizando o fotômetro portátil, apresentado no Capítulo 4;
- 4) Análise e comparação da temperatura rotacional da OH(8,3) obtida utilizando três modelos distintos dos coeficientes de Einstein e a comparação da temperatura rotacional da OH(8,3) com a OH(6,2), apresentado nos Capítulos 5 e 6.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente Dissertação de Mestrado está estruturada em seis capítulos e três apêndices. O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, onde se faz uma discussão sobre a estrutura da atmosfera terrestre e um estudo mais detalhado sobre o espectro de emissão de origem vibracional - rotacional da molécula OH.

O Capítulo 3 contém a descrição dos fotômetros utilizados, o método utilizado na calibração dos instrumentos, a forma de redução dos dados e os erros associados na determinação da temperatura e intensidade da emissão da OH(8,3).

O Capítulo 4 fornece uma descrição dos dados obtidos durante os meses de agosto a novembro de 1999, no Centro Espacial de Cachoeira Paulista – SP.

No Capítulo 5 apresenta-se a análise realizada nos dados obtidos pelos fotômetros e a discussão dos resultados obtidos nesta Dissertação de Mestrado.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e fornecidas sugestões para os futuros trabalhos e o desenvolvimento de novos projetos.

O Apêndice A contém as constantes utilizadas para determinar a energia de vibração e rotação da OH, o espectro de emissão da OH(8,3) e os coeficientes de Einstein utilizados.

No Apêndice B é apresentada a forma para determinar-se a taxa de emissão volumétrica da OH(8,3). O Apêndice C ilustra um exemplo dos arquivos gerados pelo programa de aquisição de dados do fotômetro portátil e pelo programa de redução dos dados.

CAPÍTULO 2

CONHECIMENTOS BÁSICOS

Nossa atmosfera é o meio para o desenvolvimento da vida na superfície terrestre e é a região de transição entre a Terra e o Espaço. O homem sempre apresentou interesse nas características, manifestações e perturbações da atmosfera, tais como: as mudanças climáticas, o brilho do pôr do Sol, a exuberância de cores do arco-íris e o espetáculo visual das auroras.

2.1 A ATMOSFERA TERRESTRE

A Terra formou-se há aproximadamente 5 bilhões de anos. Acredita-se que a atmosfera terrestre teve sua origem pela liberação de gases do interior da Terra. Na atmosfera primordial, os gases mais abundantes eram provavelmente o gás carbônico, o vapor d' água e o hidrogênio, liberados por erupções vulcânicas. A única fonte de produção de oxigênio era a dissociação do vapor d' água pela radiação solar. O oxigênio liberado era rapidamente consumido em outras reações, especialmente com rochas da superfície, oxidando os materiais nela presentes (Kirchhoff, 1991).

A quantidade de oxigênio na atmosfera passou a ser significativa com o surgimento das algas e pequenos microrganismos, que sintetizam suas moléculas orgânicas usando gás carbônico e água nos processos de fotossíntese, e assim, liberando o oxigênio. Esta produção de oxigênio superou as perdas por oxidação e permitiu um acúmulo na atmosfera (Kirchhoff, 1991).

Baseando-se no perfil de temperatura, na composição química e nos processos físicos dominantes, a atmosfera terrestre é subdividida em regiões. A Figura 2.1 apresenta a estrutura da atmosfera baseada nestas características.

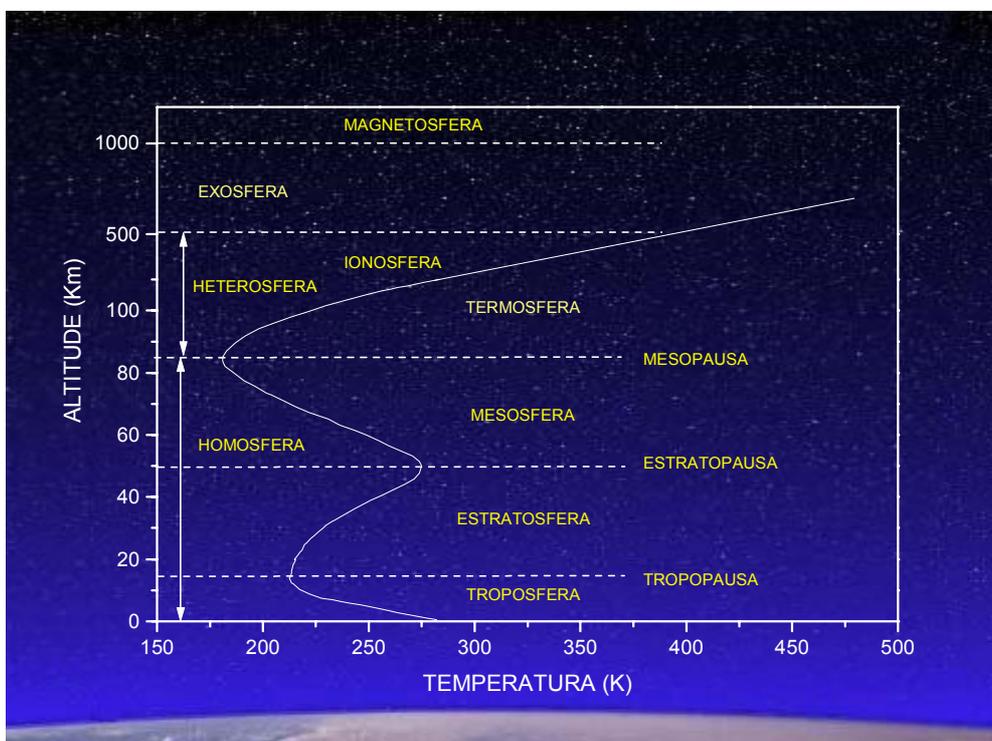


Fig. 2.1 - Atmosfera terrestre estruturada em camadas.
FONTE: Adaptada de Brasseur e Solomon (1986, p. 33).

Os conceitos a seguir são descritos com base nos trabalhos de: Rishbeth e Garriott (1969), Banks e Kockarts (1973), Wallace e Hobbs (1977), Brasseur e Solomon (1986), Kirchhoff (1991) e Balan et al. (1997). A atmosfera segundo seu perfil de temperatura é estruturada em:

- 1) Troposfera – é a camada mais próxima da superfície terrestre, estendendo-se até aproximadamente 15 km, onde a temperatura diminui com a altitude a partir da temperatura superficial de 290 K, numa taxa de -7 K.km^{-1} , atingindo o valor de 220 K. Nesta região a radiação e a convecção são processos importantes para a transferência de energia, isto é, na dissipação do calor. A absorção direta da radiação solar no

visível e no infravermelho contribui para o balanço radiativo e influenciam também na determinação da temperatura.

- 2) Estratosfera – é a camada que se encontra acima da troposfera, situada entre 15 e 50 km de altitude, onde a temperatura aumenta com a altitude ficando em torno de 270 K. Nesta região a convecção deixa de ser um mecanismo importante na dissipação de calor, dando lugar ao processo de radiação. A absorção da radiação solar pela molécula do ozônio e pelo vapor d' água, na região do ultravioleta, dão origem ao máximo de temperatura em torno de 50 km de altitude.
- 3) Mesosfera – esta camada situa-se acima da estratosfera, estendendo-se de 50 a 90 km de altitude. A temperatura diminui com a altitude atingindo 190 K, sendo esta a região mais fria de toda a atmosfera. A radiação é ainda um importante mecanismo na remoção de calor nestas altitudes.
- 4) Termosfera – esta camada inicia em torno de 90 km de altitude e estende-se até aproximadamente 300 km. A temperatura aumenta com a altitude até atingir um valor máximo de aproximadamente 3000 K, chamado de temperatura exosférica. O principal mecanismo para a dissipação de energia é a condução, sendo mínima a convecção.

As regiões de transições entre as camadas atmosféricas acima descritas são caracterizadas por um gradiente de temperatura nulo, sendo classificadas em:

- 1) Tropopausa – região compreendida entre a troposfera e a estratosfera, onde ocorre o mínimo de temperatura entre estas regiões. Situa-se a uma altitude em torno de 15 km nos trópicos, com uma temperatura em torno de 195 K, e de 8 a 10 km nos pólos com uma temperatura em torno de 220K.
- 2) Estratopausa – região entre a alta estratosfera e a baixa mesosfera. Situa-se em torno de 50 km de altitude com uma temperatura em torno de 270 K.

- 3) Mesopausa – é o limite entre a mesosfera e termosfera e situa-se em torno de 85 km de altitude, apresentando uma temperatura em torno de 190 K, considerada a mais baixa temperatura atmosférica.

A atmosfera também é sub-estruturada segundo os seus processos físicos em:

- 1) Homosfera – estende-se desde a superfície terrestre até 100 km de altitude. Nesta região a mistura dos gases é praticamente constante, isto é, a proporção de mistura de um certo gás em relação a outro se mantém.
- 2) Heterosfera – camada entre 100 e 500 km, onde predomina a difusão molecular e não existe mais uma mistura homogênea dos gases. Cada constituinte distribui-se conforme sua própria altura de escala $H=kT/mg$, onde H é a escala de altura, k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura atmosférica, m é a massa molecular e g é a aceleração da gravidade.
- 3) Exosfera – camada acima dos 500 km de altitude, onde as colisões entre os átomos e moléculas são pouco freqüentes. As partículas neutras deslocam-se em órbitas balísticas no campo gravitacional da Terra e as mais leves, tais como o H e He, são constantemente perdidas para o meio interplanetário.

A estrutura da atmosfera segundo sua composição iônica é caracterizada pela ionosfera e a magnetosfera.

- 1) Ionosfera – é a camada onde ocorre uma ionização parcial dos constituintes atmosféricos. A densidade de íons e elétrons é suficiente para afetar a propagação de ondas eletromagnéticas. Os limites da ionosfera não estão bem definidos, mas estima-se que esteja localizada entre 60 e 500 km de altitude.
- 2) Magnetosfera – situada acima da ionosfera, é a região onde a colisão entre partículas é tão pequena que quase não ocorre à interação entre

as partículas energeticamente carregadas e os constituintes neutros da atmosfera. Esta região age como um obstáculo ao vento solar, que flui em sua volta, composto por partículas energeticamente carregadas que se precipitam dentro da magnetosfera.

Pode-se subdividir a ionosfera de acordo com o perfil de densidade eletrônica, em cinco camadas ou regiões:

- 1) Camada D – é a região inferior da ionosfera, situada entre 60 e 90 km de altitude, que praticamente desaparece durante a noite. Possui uma baixa concentração de elétrons livres. As radiações ionizantes mais importantes são os raios X e a radiação solar Lyman- α .
- 2) Camada E - é a região de maior condutividade, sendo importante devido as correntes elétricas que nela fluem e sua interação com o campo magnético terrestre, situa-se entre 90 e 150 km de altitude.
- 3) Camada F1 - está situada acima da região E, em torno de 180 km de altitude. Possui um pequeno pico esporádico na concentração eletrônica.
- 4) Camada F2 - esta camada engloba toda parte superior da ionosfera, inclusive o pico de concentração iônica. Esta região é dominada por processos dinâmicos, onde existe uma grande interação da ionosfera com os ventos termosféricos.
- 5) Camada F3 – estudos de modelagem sugerem que a altitude desta camada depende das condições solares, sazonais e atmosféricas. Quando estas condições são mais fortes a altitude pode variar de 450 a 600 km de altitude. A distribuição em altitude-latitude dos fluxos de plasmas diurnos podem levar a formação da camada F3, a latitudes próximas do Equador.

Os estudos abrangidos na presente Dissertação de Mestrado envolvem processos físico-químicos interativos que ocorrem na atmosfera deste a estratosfera até a termosfera terrestre.

2.2 MEDIDAS DA TEMPERATURA ATMOSFÉRICA NA REGIÃO DA MESOPAUSA TERRESTRE

No estudo da aeronomia da atmosfera terrestre, o conhecimento da temperatura em função da altura apresenta grande importância, pois permite conhecer o balanço energético da atmosfera, isto é, o processo dinâmico e fotoquímico. Outro importante aspecto, neste estudo, é a influência que a temperatura exerce nas taxas de reações químicas e nos processos de excitação da aeroluminescência. Desta forma, para compreender a física e a química desta região é necessário conhecer a temperatura local e o seu perfil.

Nas duas seções a seguir serão apresentados o perfil da temperatura na região entre 30 e 100 km de altitude, obtida através de diferentes técnicas e experimentos, e um levantamento histórico sobre as medidas de temperatura da OH ao longo dos anos.

2.2.1 O Perfil da Temperatura Atmosférica

A maior parte do conhecimento sobre a estrutura térmica da atmosfera terrestre é devida aos experimentos com foguetes, satélites e sensoriamento remoto a partir do solo. A região da mesopausa é de difícil acesso, apresentando incertezas tanto na determinação da temperatura absoluta quanto na altura exata do mínimo da temperatura.

Modelos atmosféricos criados a partir de dados experimentais fornecem o perfil da temperatura atmosférica. O “*U. S. Standard Atmosphere Model*” de 1962 foi um dos primeiros modelos atmosféricos criados para o estudo da atmosfera terrestre. Com o passar dos anos vários outros modelos atmosféricos foram criados, entre eles o “*U.S. Supplemental Atmosphere*” de 1966, o “*COSPAR International Reference Atmosphere Model*” (CIRA) de 1965 e atualmente o CIRA de 1986.

A Figura 2.2 apresenta a comparação dos perfis da temperatura atmosférica entre os modelos atmosféricos “U.S. Standard Atmosphere” de 1965, “U.S. Supplemental Atmosphere” de 1966 e o modelo CIRA de 1965 e dos dados obtidos por sondas esféricas, foguetes de sondagem e radiosondas.

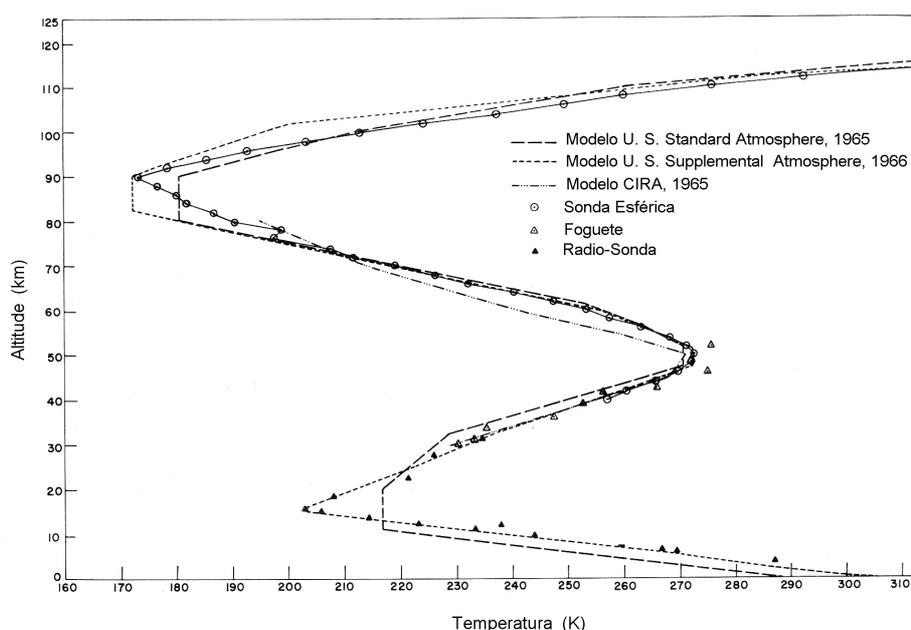


Fig. 2.2 - Comparação do perfil da temperatura atmosférica terrestre obtido pelos modelos atmosféricos *U.S. Standard Atmosphere* de 1965, *U.S. Supplemental Atmosphere* de 1966 e o modelo CIRA de 1965 e por dados obtidos no dia 28.07.64 às 13:06 hora local, em Novo México, usando sondas esféricas, foguetes de sondagem e radiosondas
 FONTE: Adaptada de Faire e Champion (1967, p.852).

Observa-se na Figura 2.2 que a região entre 60 km e 80 km de altitude, a temperatura obtida por sondas esféricas apresentam boa concordância com os modelos “U.S. Standard” e “U.S. Supplemental” e divergem do modelo CIRA. Entre 80 e 100 km de altitude a temperatura obtida pelas sondas esféricas apresentam valores intermediários entre os modelos “U.S. Standard” e “U.S. Supplemental” e acima de 100 km a temperatura apresenta boa concordância como os valores obtidos pelo modelo “U.S. Supplemental Atmosphere”. Os

dados obtidos por foguetes e radiosondas não mediram a temperatura na região da mesopausa.

A Figura 2.3 apresenta os perfis da temperatura atmosférica observadas por sondas, espectrômetro de massa e acelerômetro. Os perfis da temperatura observados nestes experimentos apresentam grandes variações verticais, devido a dinâmica da atmosfera nesta região e dos diferentes tipos de medidas usadas. A propagação de ondas de gravidade com largas amplitudes através da mesosfera são as responsáveis por gradientes de temperatura nesta região (Schubert et al., 1990).

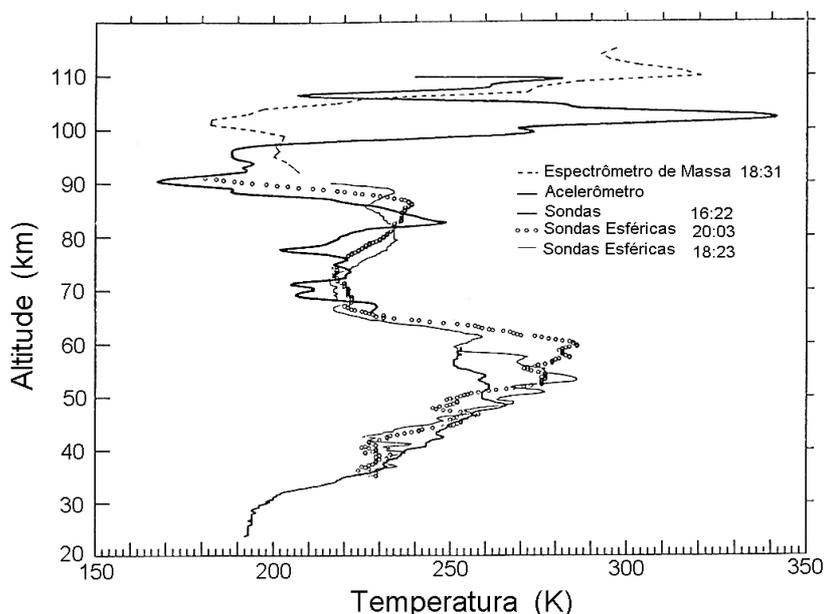


Fig. 2.3 - Perfis da temperatura atmosférica terrestre obtida por diferentes experimentos, tais como espectrômetro de massa, acelerômetros e sondas esféricas.

FONTE: Adaptada de Schubert et al. (1990, p.19.066).

Enquanto as medidas de aeroluminescência não possuem resolução em altura e as de foguetes e satélites são localizadas no tempo, aquelas que utilizam radar de Laser são as que melhor oferecem resolução espacial e temporal. A Figura 2.4 apresenta os perfis da temperatura e da densidade de sódio obtidos com o radar de laser do INPE em São José dos Campos. Observa-se a

presença de dois mínimos da temperatura nas regiões em torno de 92 e 102 km de altitude.

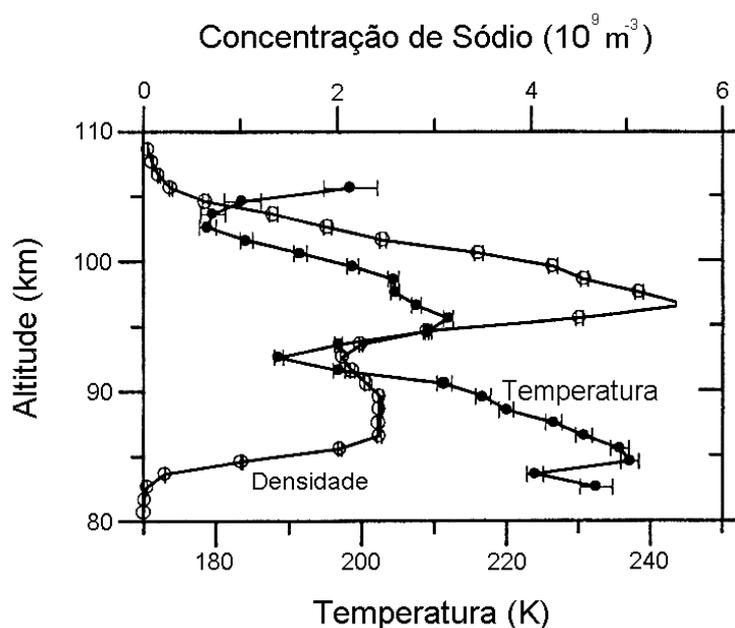


Fig. 2.4 - Perfil da temperatura atmosférica e da concentração de sódio observados na noite de 19.08.98 às 22:33 hora local, com o radar de Laser do INPE em São José dos Campos.
FONTE: Adaptada de Clemesha et al. (1999, p.1682).

Pesquisas recentes apresentam uma característica interessante no perfil de temperatura na região entre 85 e 95 km, ver Figuras 2.3 e 2.4. Nesta região a inversão térmica do gradiente de temperatura passa a ser positivo, levando a formação de dois mínimos locais na temperatura. Os modelos atmosféricos como o CIRA de 1986 não prevêem este duplo pico presente na temperatura atmosférica a estas altitudes.

A temperatura nesta região apresenta comportamentos distintos dependendo dos experimentos, estações do ano, localização geográfica e influência da dinâmica que ocorre na atmosfera, sendo a temperatura um parâmetro útil nas pesquisas do comportamento físico-químico da alta atmosfera.

2.2.2 Histórico sobre as Medidas de Temperatura na Mesopausa através do Espectro da OH

As emissões da aeroluminescência terrestre da OH foram primeiramente medidas por Meinel (1950a, b) que forneceu evidências consistentes de que a temperatura rotacional poderia ser obtida a partir da população nos níveis rotacionais excitados da OH. Kvifte (1959) determinou a temperatura rotacional da OH confirmando os resultados apresentados por Meinel (1950a, b).

Em 1953 Chamberlain e Oliver observaram que a temperatura rotacional da OH apresentava um aumento significativo à medida que aumentava a latitude, de 42° N para 70° N. Estes resultados foram confirmados por Wallace (1960) e Chamberlain (1961) que observaram que a temperatura permanecia em torno de 220 K para latitudes de 40° N a 50° N e aumentava para 300 ou 400 K a latitudes em torno de 75° N.

Vários autores realizaram estudos sistemáticos para encontrar algum tipo de variação sazonal da temperatura rotacional da OH, entre eles, Wallace (1961) e Krassosvky et al. (1961) encontram um máximo na temperatura no inverno e um mínimo no verão. Observando várias bandas da OH nas estações de Ås e Tromsø, Kvifte (1967) determinou a temperatura rotacional e não encontrou dependência sazonal nem variação latitudinal em seus resultados.

Utilizando os dados de vários anos e de diferentes estações Shefov (1969) encontrou variação sazonal na intensidade e na temperatura rotacional da OH em diferentes latitudes. Ele também detectou a influência dos distúrbios geomagnéticos na intensidade e na temperatura rotacional da OH durante a variação do ciclo solar. Nestas condições, observou poucos dias antes do início da tempestade magnética variações periódicas da intensidade e da temperatura rotacional, perdurando por até 30 dias após o início.

As temperaturas observadas até os anos 70 apresentaram uma grande faixa de variação entre os locais de observações e autores. As prováveis causas

destas diferenças eram devido a técnica utilizada nas medidas dos espectros, a baixa resolução espectral e a baixa sensibilidade dos detectores empregados nesta época e que influenciaram na qualidade dos resultados

Utilizando um fotômetro com filtro de interferência inclinável Visconti et al. (1971) foram os primeiros a utilizar este método na determinação da temperatura rotacional da OH(8,3). Porém, os resultados obtidos por eles não apresentaram correlação a longo prazo entre a temperatura rotacional e a intensidade.

Em 1974, Takahashi et al. utilizaram o mesmo princípio apresentado por Visconti et al. (1971) para determinar a temperatura rotacional da OH(8,3) no Brasil, latitude de 23° S. Os resultados obtidos por Takahashi et al. também mostraram que não havia correlação entre as variações noturnas da intensidade e da temperatura da OH(8,3).

Entretanto, os resultados obtidos por Krassovsky (1972) e Krassovsky e Shegaev (1974) mostraram variações quase periódicas na temperatura atribuídas à influência de ondas de gravidade na mesosfera. No primeiro destes dois trabalhos, as ondas de gravidade apresentaram períodos de aproximadamente 60 minutos movendo de leste para oeste com velocidade de 250 m/s, No segundo trabalho as ondas apresentaram períodos menores, de 10 a 15 minutos, com velocidades variando de 230 a 300 m/s.

Em 1977, Takahashi et al. determinaram a fase e a amplitude da maré nas variações da intensidade e temperatura rotacional da OH(8,3) mostrando que estavam em boa concordância com as variações determinadas experimentalmente. Também foram encontradas variações diárias e significantes efeitos sazonais na intensidade e temperatura rotacional.

Takeuchi e Misawa (1979) apresentaram um novo método para determinar a temperatura rotacional da OH através de sucessivas aproximações nas intensidades das linhas rotacionais. Este método poderia ser usado como

ferramenta para o estudo de ondas de gravidade internas e na determinação da temperatura rotacional da OH para os espectros com baixa resolução.

Em Mawson, Antártica, as medidas da temperatura rotacional da OH(8,3) foram determinadas por Stubbs et al. (1983). As temperaturas por eles observadas apresentam valores menores do que aquelas obtidas em latitudes semelhantes no Hemisfério Norte. A única tendência observada, foi à diminuição gradual da temperatura ao longo da noite, não houve evidências de um aquecimento devido à atividade auroral.

Myrabø et al. (1984) observaram a temperatura rotacional da OH(8,3), na latitude de 78,4° N, durante um evento de aquecimento estratosférico. Uma queda na temperatura da ordem de 40 K foi observado próximo a mesopausa parecendo estar associada com um correspondente aquecimento estratosférico da ordem de 20 K. Os autores observaram através da temperatura rotacional da OH(8,3) um atraso de 1 a 2 dias entre um aquecimento estratosférico máximo e um resfriamento máximo próximo da mesopausa.

Em 1987, Murtagh et al. usando foguetes realizaram medidas de crepúsculo da OH(8,3), que apresentou uma intensidade de aproximadamente 100 R, mostrando razoável concordância com os cálculos obtidos pelos modelos atmosféricos. Utilizando o espalhamento Rayleigh da luz solar, o autor determinou o perfil de temperatura na mesosfera, que apresentou bons resultados quando comparado com o modelo CIRA de 1972 para esta estação.

Medindo a intensidade e a temperatura rotacional da OH(6,2) e OH(8,3), Sivjee e Hamwey (1987) usaram vários coeficientes de Einstein e verificaram que a temperatura calculada usando os coeficientes de Hönl e London obtidos em 1925 era maior que a temperatura calculada utilizando os coeficientes obtidos por Mies em 1974 e os coeficientes determinados por Espy em 1986. Utilizando os coeficientes Mies (1974), os autores notaram que a temperatura da OH(8,3) era superior a da OH(6,2) com 213 K e 207 K respectivamente, implicando num gradiente de temperatura de 3 a 5 K.km⁻¹ nas regiões próximas a 85 km.

Em 1989, Viereck e Deehr mediram variações quase periódicas na intensidade e temperatura rotacional da OH e assumiram que o resultado desta mudança na estável camada de emissão da OH era devido às ondas de gravidade.

Um método teórico foi proposto por Schubert et al. (1990) para determinar a temperatura média na região da mesopausa, utilizando a temperatura rotacional da OH(6,2). Este método fornecia informações sobre a estrutura térmica da mesopausa e sobre a diferença da temperatura através da região de emissão. Os autores também discutem as diferenças apresentadas na temperatura como consequência dos coeficientes de Einstein adotados, mostrando que a temperatura média determinada utilizando os coeficientes obtidos por Turnbull e Lowe (1989) é maior do que a temperatura utilizando os coeficientes determinados por Mies (1974).

Mulligan et al. (1995) observaram a temperatura na região da mesopausa através da intensidade e da temperatura rotacional da OH(3,1) e OH(4,2). Os dados de temperatura apresentaram boa concordância com os resultados obtidos pelo satélite *Solar Mesosphere Explorer* (SME). A temperatura calculada para a OH(4,2) era quase sempre maior que a temperatura da OH(3,1), porém o autor argumenta que a razão desta diferença se deve aos diferentes coeficientes de Einstein adotados.

Em 1998 Greet et al. determinaram a temperatura rotacional da OH(6,2) com o intuito de estabelecer uma base de dados para monitorar a mudança climática na mesosfera da região Antártica. Os valores médios da temperatura determinado pelo autor são consistentes se comparados com o modelo CIRA-1986. Neste trabalho o autor discute as diferenças encontradas na temperatura utilizando os coeficientes de Einstein determinados por Mies (1974), Langhoff et al. (1986) e Turnbull e Lowe (1989).

Takahashi et al. (1999) observaram a variação espacial na intensidade e na temperatura rotacional da OH(6,2) e nos dados de ventos obtidos simultaneamente em Singaraki. Nestas observações os autores detectaram a

propagação de ondas de gravidade e determinaram seus parâmetros intrínsecos na mesosfera. Na determinação da temperatura rotacional da OH(6,2) os autores utilizaram os coeficientes de Einstein obtidos por Mies (1974) e Turnbull e Lowe (1989) e observaram uma diferença de 5 K na temperatura utilizando estes coeficientes.

Atualmente algumas das discussões sobre a temperatura rotacional da OH recaem sobre a diferença apresentada devido ao uso dos vários coeficientes de Einstein existentes na literatura. Um dos objetivos desta Dissertação de Mestrado é, portanto, investigar esta diferença observada no espectro da OH(8,3) utilizando os coeficientes de Einstein determinados por Mies, Langhoff et al. e Turnbull e Lowe.

2.3 A MOLÉCULA DA HIDROXILA - OH

As bandas de Meinel, como são conhecidas as emissões da molécula hidroxila, OH, originam-se das suas transições vibracionais-rotacionais. Estas transições emitem radiação entre os comprimentos de onda de 520 nm a 2,7 μm (Meinel, 1950a, b) e possuem uma intensidade integrada total de aproximadamente 4,5 MR^1 (Egeland et al., 1973).

Perfis de emissões atmosféricas, obtidos por foguetes, mostraram que a camada emissora da OH está localizada entre 80 e 100 Km de altitude, com um pico entre 85 e 90 km na região da mesopausa. A espessura desta camada está em torno de 7 a 10 km (Meriwether, 1989).

A origem da energia e os processos de emissão que compõe o espectro da molécula OH, bem como a sua determinação, são descritos nas seções subseqüentes.

¹ $1\text{MR} = 10^3\text{R}$, $1\text{R} = 1 \text{ Rayleigh} = 10^6 \text{ fótons.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{colunar}$.

2.3.1 Energia da Molécula

Para o estudo de moléculas diatômicas é aceito pela comunidade científica a utilização da aproximação de que as funções de onda para os movimentos eletrônico (Ψ_e), vibracional (Ψ_v) e rotacional (Ψ_r), são desacoplados e a função de onda total pode ser descrita pela relação:

$$\Psi = \frac{1}{r} \Psi_e \cdot \Psi_v \cdot \Psi_r \quad (2.1)$$

onde, r é a distância entre os núcleos da molécula e ψ é a função de onda total. Esta aproximação é válida mesmo considerando o spin eletrônico e a interação magnética dos movimentos angulares (Herzberg, 1950). A energia total da molécula, em Joule, baseada nesta aproximação pode ser descrita pela equação:

$$E = E_e + E_v + E_r \quad (2.2)$$

onde, E_e representa a energia eletrônica, E_v a energia vibracional dos núcleos e E_r a energia rotacional da molécula. O conceito de “termo de energia total” é apresentado de forma a simplificar a determinação da energia na molécula em estudo, que segundo Herzberg, (1950) é obtido dividindo-se a Equação (2.2) por hc , sendo descrita pela seguinte relação, em cm^{-1} :

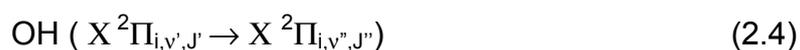
$$T = T_e + G + F \quad (2.3)$$

onde, h é a constante de Planck e c é a velocidade da luz, T é o termo da energia total, T_e representa o “termo da energia eletrônica”, G o “termo da energia vibracional” e F o “termo da energia rotacional”.

Os termos T_e , G e F que compõem o termo da energia total, da molécula OH, serão descritos separadamente nas próximas seções.

2.3.1.1 Energia Eletrônica

As emissões da molécula OH na aeroluminescência terrestre ocorrem devido a transições vibracionais-rotacionais dentro do estado eletrônico fundamental, o estado $^2\Pi$, e podem ser descritas pela seguinte relação:



onde, $i=1$ representa o estado $\Pi_{3/2}$ e $i=2$ representa o estado $\Pi_{1/2}$, v representa o nível vibracional e J o nível rotacional da molécula.

A molécula OH pode ser representada por quatro estados quânticos que são: a quantidade de movimento angular orbital, \vec{L} , o momento de spin, \vec{S} , a rotação dos núcleos, \vec{N} , e a vibração dos núcleos, \vec{v} , ao longo do eixo internuclear.

Quando a rotação dos núcleos for considerada baixa, entre $1 \leq N \leq 10$, onde N representa o número quântico de rotação nuclear, os estados quânticos da molécula OH podem ser descritos pelo caso de acoplamento (a) de Hund e quando a rotação aumenta, $N > 10$, o acoplamento válido passa a ser o caso (b) de Hund (Herzberg, 1950). Na atmosfera terrestre assume-se que ocorram $N < 10$ rotações do núcleo permitindo assim, descrever a molécula OH pelo acoplamento (a) de Hund (Takahashi, 1981).

Assim, o momento angular orbital, \vec{L} , e o momento de spin, \vec{S} , estão acoplados ao eixo internuclear pelas componentes $\vec{\Lambda}$, projeção de \vec{L} sobre o eixo internuclear, e $\vec{\Sigma}$, projeção de \vec{S} sobre o eixo internuclear. Neste caso, define-se o momento angular eletrônico $\vec{\Omega}$, pela relação:

$$\vec{\Omega} = \vec{\Lambda} + \vec{\Sigma} \quad (2.5)$$

O momento angular total da molécula, \vec{J} , é definido pela somatória do momento angular eletrônico, $\vec{\Omega}$, e da rotação dos núcleos \vec{N} :

$$\vec{J} = \vec{\Omega} + \vec{N} \quad (2.6)$$

A Figura 2.5 apresenta esquematicamente o acoplamento (a) de Hund, bem como o momento angular eletrônico, $\vec{\Omega}$, e o momento angular total, \vec{J} , da molécula OH.

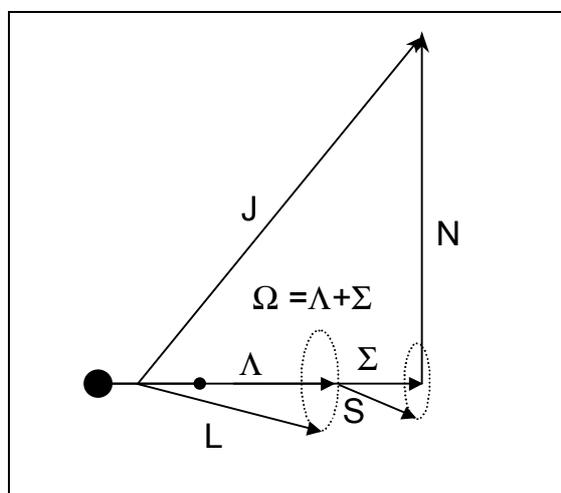


Fig. 2.5 - Diagrama vetorial para o acoplamento (a) de Hund.
 FONTE: Herzberg (1950, p. 219).

As emissões da molécula OH ocorrem devido a transições espontâneas entre os estados inicial $|P', i', v', J'\rangle$ e final $|P'', i'', v'', J''\rangle$, onde P representa a paridade (+ ou -) e i o estado de spin, v o nível de vibração e J o nível de rotação dos núcleos. Na Tabela 2.1 estão sintetizadas as representações dos estados quânticos e na Tabela 2.2 estão apresentadas as regras de seleção para a molécula OH.

TABELA 2.1 – ESTADOS QUÂNTICOS DA MOLÉCULA OH

Estados Quânticos	Nº Quântico	Descrição
Momento angular orbital	$\Lambda = 1$	Estado Π
Spin eletrônico	$\Sigma = +\frac{1}{2}$ $\Sigma = -\frac{1}{2}$	Somente um elétron fica fora da camada.
Momento angular eletrônico	$\Omega = \Lambda + \Sigma = \frac{3}{2}$ $\Omega = \Lambda + \Sigma = \frac{1}{2}$	Caso (a) de Hund.
Momento angular rotacional	$N = 0, 1, 2, \dots$	Para o caso (a) de Hund, $N > 10$.
Momento angular total	$J = \Omega + N = \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}, \dots$ $J = \Omega + N = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$	Estado ${}^2\Pi_{\frac{3}{2}}$ Estado ${}^2\Pi_{\frac{1}{2}}$
Vibração	$v = 0, 1, 2, \dots, 8, 9.$	$v=9$ é o máximo na aeroluminescência

FONTE: Takahashi (1981, p.29).

TABELA 2.2 – REGRAS DE SELEÇÃO PARA TRANSIÇÕES

Tipo de Transição	Regras de Seleção e Nomenclatura dos Espectros
$\Delta\Lambda$	$\Delta\Lambda = 0, \pm 1$; $\Delta\Lambda = 0 \rightarrow$ transição $\Pi - \Pi$, caso da Aeroluminescência Noturna da OH.
$\Delta\Sigma$	$0 \rightarrow$ lei da conservação do spin ${}^2\Pi_{\frac{3}{2}} \rightarrow i=1$ ${}^2\Pi_{\frac{1}{2}} \rightarrow i=2$
ΔJ	$+1 : J \rightarrow J+1$ (Ramo P). Para $i=1$ tem-se P_1 e $i=2 - P_2$ $0 : J \rightarrow J$ (Ramo Q). Para $i=1$ tem-se Q_1 e $i=2 - Q_2$ $-1 : J \rightarrow J-1$ (Ramo R). Para $i=1$ tem-se R_1 e $i=2 - R_2$
P Paridade	$(+) \leftrightarrow (-)$, $(+) \leftrightarrow (+)$, $(-) \leftrightarrow (-)$
Δv	$0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5 \dots$ Oscilador anarmônico Ex. $v=8 \rightarrow v=3$; $\Delta v=5$: banda (8,3)

FONTE: Takahashi (1981, p.30).

2.3.1.2 Energia Vibracional

O termo da energia vibracional da molécula OH, para o caso da aproximação do oscilador anarmônico (Herzberg, 1950), é representado na seguinte forma:

$$G(v) = w_e(v + \frac{1}{2}) - w_e x_e(v + \frac{1}{2})^2 + w_e y_e(v + \frac{1}{2})^3 - w_e z_e(v + \frac{1}{2})^4 + \dots \quad (2.7)$$

onde, $G(v)$ é o termo da energia vibracional, dado em cm^{-1} , v é o nível vibracional e $w_e, w_e x_e, \dots$ são constantes vibracionais, em cm^{-1} .

Com as constantes vibracionais calculadas por Chamberlain e Roesler (1955), utilizando o espectro da aeroluminescência, a energia vibracional da OH descrita por Krassovsky et al. (1962) pode ser representada pela seguinte relação:

$$G(v) = 3737,90 \cdot (v + \frac{1}{2}) - 84,965 \cdot (v + \frac{1}{2})^2 + 0,5398 \cdot (v + \frac{1}{2})^3 - 0,01674 \cdot (v + \frac{1}{2})^4 + \dots \quad (2.8)$$

A determinação de $G(v)$ para os níveis vibracionais de 0 a 10 foram calculados por Coxon e Foster (1982) utilizando um grande conjunto de espectros observados. Quanto à excitação vibracional na região da mesosfera, estas podem ocorrer somente nos níveis vibracionais de 0 a 9. Os valores de $G(v)$ calculados por Coxon e Foster (1982), utilizados nesta Dissertação, encontram-se relacionados na Tabela 2.3.

2.3.1.3 Energia Rotacional

Os termos para o cálculo da energia rotacional, $F(J)$ em cm^{-1} , da molécula OH, descritos por Hill e Van Vleck (1928) podem ser determinados pelas relações:

$$F_1(J) = B_v \cdot [(J + \frac{1}{2})^2 - \Lambda^2 - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{4 \cdot (J + \frac{1}{2})^2 + Y_v \cdot (Y_v - 4) \cdot \Lambda^2}] - D_v J^4 \quad (2.9)$$

$$F_2(J) = B_v \cdot [(J + \frac{1}{2})^2 - \Lambda^2 + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{4 \cdot (J + \frac{1}{2})^2 + Y_v \cdot (Y_v - 4) \cdot \Lambda^2}] - D_v (J + 1)^4 \quad (2.10)$$

onde, $\Lambda=1$ representa o estado ${}^2\Pi$, B_v representa a constante rotacional, D_v representa a influência da força centrífuga, Y_v representa o acoplamento entre o spin e o momento angular. As constantes B_v , D_v e Y_v determinadas por Coxon e Foster (1982), são apresentadas na Tabela 2.3.

TABELA 2.3 – ENERGIA VIBRACIONAL $G(v)$ E AS CONSTANTES VIBRACIONAIS DA MOLÉCULA OH

v	G_v (cm^{-1})	B_v (cm^{-1})	$D_v \times 10^{-3}$ (cm^{-1})	Y_v (cm^{-1})
0	1847,726	18,5504	1,9083	-7,496
1	5417,369	17,8386	1,9685	-7,810
2	8821,410	17,1363	1,8345	-8,146
3	12061,771	16,4409	1,8045	-8,506
4	15139,548	15,7491	1,7809	-8,895
5	18054,848	15,0567	1,7650	-9,318
6	20806,549	14,3588	1,7654	-9780
7	23392,029	13,6492	1,7838	-10,293
8	25806,719	12,9169	1,7984	-10,869
9	28043,783	12,1517	1,8599	-11,536

FONTE: Coxon e Foster (1982).

As duas séries de energia rotacional da molécula OH ocorrem devido ao desdobramento do spin onde $F_1(J)$ refere-se ao estado ${}^2\Pi_{3/2}$ e $F_2(J)$ refere-se ao estado ${}^2\Pi_{1/2}$. Os valores dos resultados determinados para a energia rotacional são apresentados no Apêndice A.

A Figura 2.6 apresenta a estrutura vibracional e rotacional da molécula OH dentro do seu estado eletrônico fundamental. Na Figura 2.6-A observa-se a curva potencial da estrutura vibracional da OH, as transições que ocorrem dentro deste “poço de potencial” dão origem às bandas de emissão da molécula. A Figura 2.6-B apresenta transições rotacionais do nível vibracional 8 para o nível vibracional 3. Estas transições vibracionais-rotacionais dão origem às linhas de emissão da banda OH(8,3), a linha $P_1(3)$ por exemplo, significa que ocorre uma transição do nível rotacional $J=5/2$, dentro do nível vibracional $v=8$, para o nível rotacional $J=7/2$, dentro do nível vibracional $v=3$.

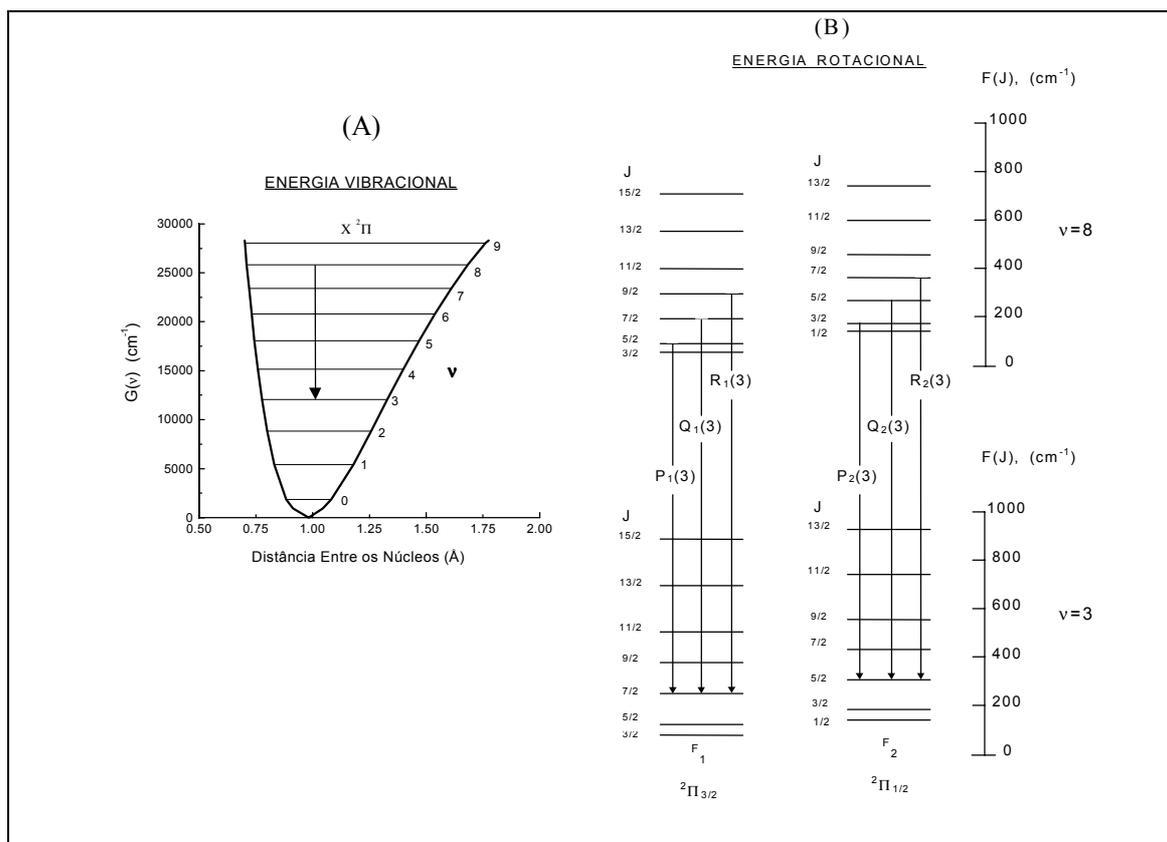


Fig. 2.6 - Representação dos níveis vibracionais e rotacionais que dão origem as linhas que compõe o espectro de emissão da molécula OH.
 FONTE: Adaptada de Krassosvsky et al. (1962, p. 895 e 896).

A energia, em cm^{-1} , de um nível vibracional-rotacional da molécula OH é a soma das energias vibracional, $G(v)$, e rotacional, $F(J)$, descrita pela relação:

$$GF_i(v, J) = G(v) + F_i(J) \quad (2.11)$$

onde, $i=1$ representa o estado $\Pi_{3/2}$ e $i=2$ representa o estado $\Pi_{1/2}$.

A energia de transição entre dois níveis vibracionais-rotacionais é obtida utilizando-se a Equação (2.11) para dois estados distintos. As bandas vibracionais são formadas por três ramos: P, Q e R que dependem da transição rotacional ($\Delta J = 0, \pm 1$). O número de onda ν , cm^{-1} , dos espectros dos ramos são dados por:

- Ramo P ($\Delta J = 1$)

$$\nu_i(\nu', \nu'', J') = GF_i(\nu', J') - GF_i(\nu'', J'+1) \quad (2.12)$$

- Ramo Q ($\Delta J = 0$)

$$\nu_i(\nu', \nu'', J') = GF_i(\nu', J') - GF_i(\nu'', J') \quad (2.13)$$

- Ramo R ($\Delta J = -1$)

$$\nu_i(\nu', \nu'', J') = GF_i(\nu', J') - GF_i(\nu'', J'-1) \quad (2.14)$$

É possível converter o número de onda, ν (cm^{-1}), em comprimento de onda para o vácuo, λ (nm) usando a seguinte relação:

$$\lambda_{\text{vácuo}} = \frac{1}{\nu} \times 10^7 \quad (2.15)$$

Para obter o comprimento de onda no ar deve-se considerar o índice de refração “n” do ar e o comprimento de onda pode ser descrito pela relação:

$$\lambda_{\text{ar}} = \frac{1}{n} \lambda_{\text{vácuo}} \quad (2.16)$$

onde, a expressão de “n” utilizado na Equação (2.16) foi obtido do Almanaque de Ciência do Observatório Astronômico de Tóquio (1970) e é definida pela seguinte relação:

$$n = 1 + \left(6432,8 + \frac{2949810}{146 - \frac{1}{\lambda_{\text{vácuo}}^2}} + \frac{25540}{41 - \frac{1}{\lambda_{\text{vácuo}}^2}} \right) \times 10^7 \quad (2.17)$$

Os valores dos “números de onda”, comprimentos de onda no vácuo, $\lambda_{\text{vácuo}}$, comprimentos de onda no ar, λ_{ar} , calculados para a OH(8,3) são apresentados nas Tabelas A2, A3 e A4, respectivamente, do Apêndice A.

2.3.2 A Intensidade das Linhas Vibracionais-Rotacionais da OH

A intensidade de emissão de uma linha rotacional, dentro de uma banda vibracional, depende da população de moléculas no nível vibracional superior $N_{(i,v',J')}$ e dos coeficientes de Einstein $A_{(i,v',J' \rightarrow i, v'', J'')}$, podendo ser expressa por:

$$I_{(i,v',J' \rightarrow i, v'', J'')} = N_{(i,v',J')} \cdot A_{(i,v',J' \rightarrow i, v'', J'')} \quad (2.18)$$

A análise do espectro de emissão vibracional-rotacional da molécula OH fornece a taxa da população da mesma nos níveis rotacionais superiores. Supondo que a molécula esteja em equilíbrio térmico com o ambiente, a distribuição das partículas nos níveis rotacionais superiores obedece à distribuição de Maxwell-Boltzmann (Takahashi, 1973). Assim, a intensidade das linhas de emissão são determinadas pelas equações:

$$I_{(i,v',J' \rightarrow i,v'',J'')} = N_{i,v'} \cdot A_{(i,v',J' \rightarrow i,v'',J'')} \cdot \frac{2(2J'+1)}{Q_{v'}} \cdot \exp\left(-\frac{GF(i,v',J')}{kT}\right) \quad (2.19)$$

$$Q_{v'} = \sum_{J',i} 2(2J'+1) \exp\left(-\frac{GF(i,v',J')}{kT}\right) \quad (2.20)$$

onde, $Q_{v'}$ representa a função de partição dos níveis rotacionais, k é a constante de Boltzmann, $k=0,6952 \text{ cm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e T é a temperatura (Herzberg, 1950). O termo $(2J' + 1)$ expressa a degenerescência do estado J' .

Os coeficientes de Einstein, $A_{(i,v',J' \rightarrow i,v'',J'')}$ em s^{-1} , para uma transição radiativa entre dois estados podem ser descritos pela relação (Turnbull e Lowe, 1989):

$$A_{(i,v',J' \rightarrow i,v'',J'')} = \frac{64 \pi \nu^3}{3h(2J'+1)} \cdot \left| \langle i, v'', J'' | \hat{\mu}(r) | i, v', J' \rangle \right|^2 S_{J',J''} \quad (2.21)$$

onde, ν é o número de onda da transição, (i,v'',J'') e (i,v',J') representam, respectivamente, os números quânticos do estado vibracional-rotacional superior e inferior, $\mu(r)$ é a função do momento de dipolo elétrico, $S_{J',J''}$ é o fator

de intensidade da linha rotacional e h é a constante de Planck. Inicialmente, os coeficientes de Einstein eram obtidos usando-se o fator de intensidade da linha rotacional, $S_{J'J''}$. Atualmente, estes coeficientes são determinados em laboratório e seus valores encontram-se tabelados para todas as bandas, facilitando o seu uso.

A intensidade normalizada ($I_{\alpha}^n = I_{\alpha} / \sum I_{\alpha}$) das principais linhas de emissão da banda OH(8,3) determinadas usando os coeficientes de Einstein obtidos por Turnbull e Lowe (1989) é apresentada na Figura 2.7. Os valores da intensidade normalizada apresentados na Figura 2.7 encontram-se na Tabela A5 do Apêndice A.

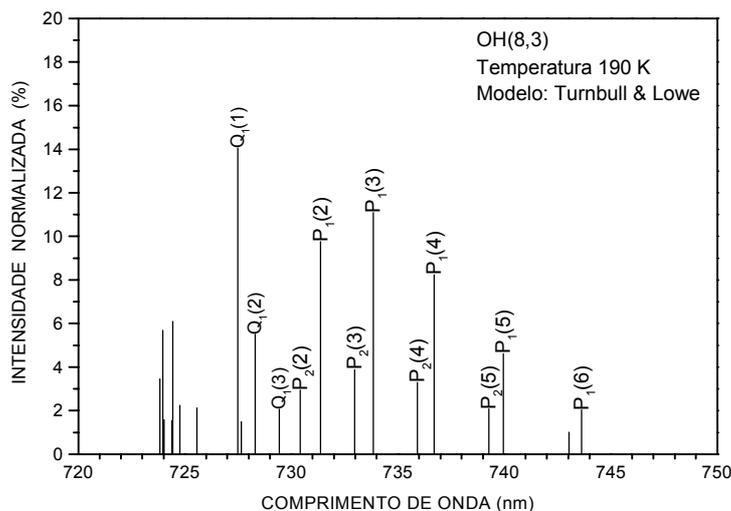


Fig. 2.7 - Linhas de emissão da OH(8,3) determinadas para a temperatura de 190 K usando os coeficientes de Einstein obtidos por Turnbull e Lowe (1989).

O espectro de emissão da aeroluminescência noturna para os comprimentos de onda entre 6000 e 9000 Å, ou seu equivalente em unidades nanométricas, de 600 a 900 nm, é apresentado na Figura 2.8. Nesta região do espectro

encontram-se as linhas de emissão do oxigênio atômico, a banda do oxigênio molecular e as principais bandas de emissão da OH.

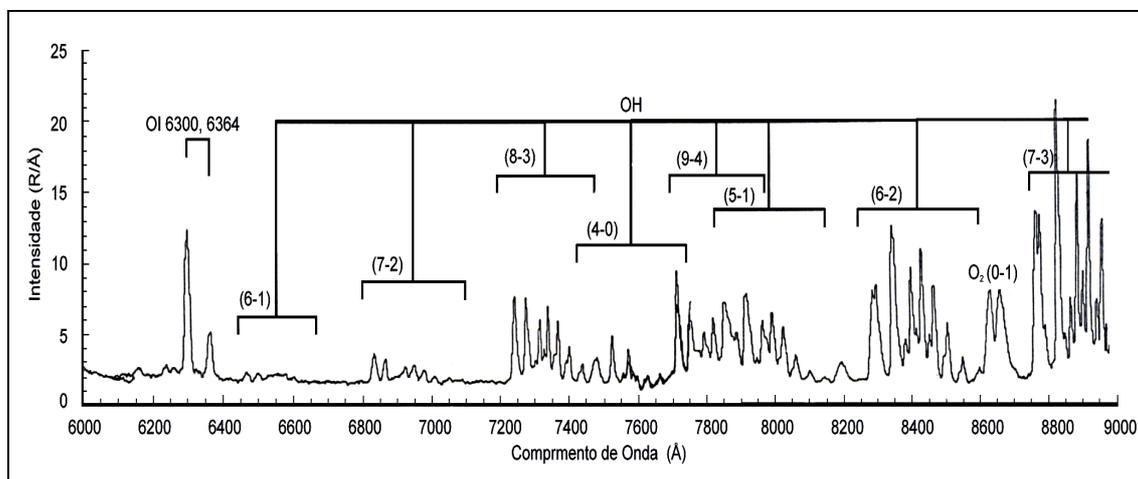


Fig. 2.8 - Espectro da aeroluminescência noturna mostrando algumas das principais bandas de emissão da OH.

FONTE: Adaptada de Johnston e Broadfoot (1993, p.21595).

2.3.2.1 Os coeficientes de Einstein

Os coeficientes de Einstein são parâmetros importantes no estudo da fotoquímica da OH pois eles são utilizados na determinação da população dos níveis vibracionais e do perfil da emissão volumétrica desta molécula.

Mies (1974) relatou a controvérsia existente na literatura com respeito aos exatos coeficientes de Einstein para as transições vibracionais e rotacionais da OH no seu estado eletrônico fundamental. A partir do trabalho de Hill e Van Vleck em 1928 têm-se firmado esforços para derivar novos valores dos coeficientes de Einstein com maior precisão para sua aplicação nos fenômenos atmosféricos e astrofísicos.

Os primeiros valores dos coeficientes de Einstein foram obtidos por Hönl e London em 1925, Heaps e Herzberg em 1952 e Benedict et al. em 1953. Segundo Takahashi (1981) os valores calculados semi-empiricamente por

Murphy, (1971) apresentaram a melhor concordância com os valores relativos obtidos nas suas observações da aeroluminescência terrestre.

Em 1974 Mies determinou os coeficientes de Einstein repetindo os cálculos feitos em 1974 por Stevens et al. e aperfeiçoou as funções de onda da OH para apresentar a melhor aproximação sobre a função do momento de dipolo elétrico (Meriwether, 1989).

Langhoff et al. (1986) calcularam os valores absolutos dos coeficientes de Einstein seguindo o mesmo tratamento feito por Mies em 1974, porém melhorando os cálculos das funções de onda da OH necessárias para determinar a integral do momento de dipolo elétrico.

Em 1989, Turnbull e Lowe observaram que os coeficientes obtidos por Langhoff et al. (1986) não estavam de acordo com os valores das intensidades observadas. No ano anterior, eles combinaram medidas precisas do momento de dipolo para os níveis vibracionais $v = 0, 1$ e 2 , obtidos em 1984 por Peterson et al., com medidas da intensidade da aeroluminescência para determinar empiricamente a função do momento de dipolo elétrico da qual os coeficientes de Einstein foram calculados (Turnbull e Lowe, 1989).

Os coeficientes de Einstein obtidos por Nelson et al. (1990) abrangem apenas as transições que envolvem $\Delta v=1, 2$ e 3 e apresentam uma incerteza menor que 10% na determinação experimental das transições mais intensas. Estes coeficientes não envolvem a maioria das bandas observadas, como por exemplo à banda OH(8,3) e OH(6,2).

Mais recentemente Holtzclaw et al. (1993) e Goldman et al. (1998) calcularam os coeficientes de Einstein para transições vibracionais-rotacionais da OH, com particular ênfase nas transições envolvendo altos níveis rotacionais, e transições rotacionais puras, as primeiras a serem publicadas na literatura para a OH.

Acredita-se que os coeficientes de Einstein utilizados com maior precisão para o estado fundamental e os níveis vibracionais inferiores da OH sejam aqueles devido a Nelson et al. (1990). Nos níveis vibracionais superiores estes coeficientes apresentam grandes divergências. Em geral os valores calculados por Turnbull e Lowe (1989) são os mais elevados e os calculados por Langhoff et al. (1986) apresentam os menores valores. A diferença para $\Delta v=5$, o caso da OH(8,3), fica em torno de um fator de 4 entre estes cálculos (Golden, 1997).

Os valores dos coeficientes de Einstein dependem da precisão da função do momento de dipolo elétrico e das funções de onda a serem empregadas. Nenhuma destas quantidades parece ser conhecida com suficiente precisão para os valores de v e J usados. Estes são os fatores que fazem com que os coeficientes de Einstein existentes na literatura apresentem diferenças entre os seus valores acarretando grandes variações na determinação da intensidade de emissão e da temperatura rotacional da OH.

Dentre os vários coeficientes de Einstein mencionados acima, somente os obtidos por Mies (1974), Langhoff et al. (1986) e Turnbull e Lowe (1989) foram utilizados neste trabalho, sendo estes os mais empregados na literatura para determinar a intensidade de emissão e a temperatura rotacional da OH(8,3).

2.3.3 Temperatura Rotacional da OH

A temperatura da atmosfera, na região em torno de 85 a 95 km, pode ser obtida através da temperatura rotacional da molécula OH (Meriwether, 1974; Takahashi et al., 1989; Wiens et al., 1991, 1995; Fagundes et al., 1997; Shiokawa et al. 1999). Isto se deve ao fato de que a frequência de colisão da OH, não considerando movimentos de rotação e vibração, é de 10^4 s^{-1} em altitudes próximas a 85 km (Sivjee e Hamwey, 1987). Este valor representa um tempo de colisão cerca de 100 vezes o tempo de vida da OH* garantindo,

*Significa que a hidroxila está em seu estado excitado.

assim, o equilíbrio térmico das populações rotacionais com o ambiente. A temperatura nesta região varia de 150 a 250 K dependendo da localização geográfica, da estação do ano e dos fenômenos relacionados com perturbações na atmosfera (Waltersheid et al., 1987).

Ao comparar a intensidade de duas ou mais linhas de emissão de um ramo dentro de uma banda, pode-se determinar a temperatura rotacional da OH (Greet et al., 1998). Esta temperatura é função da razão entre a intensidade de duas linhas de emissão. De acordo com Williams (1996), a temperatura para os ramos P da molécula OH(8,3) pode ser expressa pela relação:

$$T_{n,m} = \frac{E_{v'}(J'_m) - E_{v'}(J'_n)}{k \ln \left[\frac{I_n}{I_m} \frac{A(J'_m, 8 \rightarrow J'_{m+1}, 3) 2J'_m + 1}{A(J'_n, 8 \rightarrow J'_{n+1}, 3) 2J'_n + 1} \right]} \quad (2.22)$$

onde, $T_{n,m}$ é a temperatura rotacional estimada das intensidades relativas, I , de duas transições dos níveis rotacionais J'_n , J'_m , (nível vibracional superior v'), para J'_{n+1} , J'_{m+1} , (nível vibracional inferior v''). $E_v(J)$ é a energia do nível J, v e $A(J', v' \rightarrow J'', v'')$ é o coeficiente de Einstein de J', v' para J'', v'' .

Schubert et al. (1990) apresentaram um método teórico para calcular a temperatura na mesopausa usando vários pares de linhas de emissão vibracional-rotacional da OH(6,2). Seus resultados consideraram que a diferença entre as temperaturas calculadas para diferentes pares de linhas de emissão deve-se a um gradiente de temperatura nesta região da atmosfera (Costa, 1997).

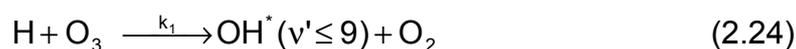
Outro método para determinar a temperatura da OH é utilizar a Equação (2.19). Invertendo esta equação obtém-se a seguinte expressão:

$$\ln \left[\frac{I_{(i, \tilde{i}', J' \rightarrow i, \tilde{i}'', J'')}}{2(2J'+1) \cdot A_{(i, \tilde{i}', J' \rightarrow i, \tilde{i}'', J'')}} \right] = \ln \left(\frac{N_{\tilde{i}'}}{Q_{\tilde{i}'}} \right) - \frac{GF(i, v', J')}{kT} \quad (2.23)$$

Ao plotar o lado esquerdo da Equação (2.23) em função de $GF(i, v', J')$ obtém-se uma reta cuja inclinação é o inverso da temperatura. Assim como na Equação (2.22) é necessário medir no mínimo a intensidade de duas linhas de emissão para obter a temperatura da OH (Krassosvky e Shagaev, 1974; Takahashi et al., 1974; Sivjee et al., 1987).

2.3.4 Fotoquímica da OH

O mecanismo mais aceito para a formação da OH^* na mesosfera superior é a reação envolvendo o hidrogênio e o ozônio, proposta por Bates e Nicolet (1950):



onde, $k_1 = 1,4 \times 10^{-10} \cdot e^{470/T} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ é a taxa de reação (Sharp e Kita, 1987).

O processo é exotérmico e libera energia de 3,34 eV (Baulch et al. 1982), o que é suficiente para excitar a OH ao nível vibracional $v = 9$. Esta hipótese é apoiada pelo fato de que somente as bandas originadas de $v \leq 9$ tem sido observadas na atmosfera (Takahashi, 1981).

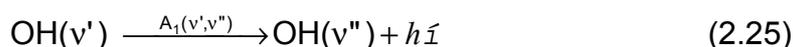
Embora a reação hidrogênio-ozônio seja conhecida como principal fonte de produção da OH^* , ainda não existe consenso a respeito da distribuição populacional nos níveis $v'=1$ a $v'=9$ entre os valores teóricos e observados (Sivjee, 1992).

Sabe-se que a reação descrita pela relação (2.24) produz OH^* preferencialmente nos níveis $v'=7, 8$ e 9 (Klenerman e Smith, 1987) não explicando assim as fontes de emissões observadas oriundas dos níveis vibracionais inferiores.

Outras fontes químicas da OH^* foram sugeridas por vários autores (e.g. Krassovsky, 1971; Takahashi e Batista, 1981). A confirmação do envolvimento

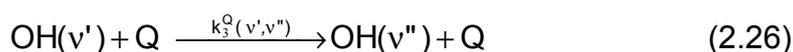
de qualquer outra fonte química, adicional na produção da OH^* é, no entanto, comprometida pelos conjuntos conflitantes dos coeficientes de Einstein e pelo desconhecimento do controle da distribuição vibracional da OH^* . Esta distribuição vibracional da OH^* , apresentada por McDade e Llewellyn (1987), é agrupada em três processos:

1) pela cascata radiativa,



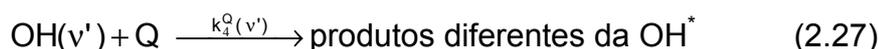
onde, $h\nu$ é a energia do fóton emitido no decaimento vibracional de v' para v'' e $A_1(v',v'')$ é o coeficiente de Einstein.

2) pelos processos de desativação colisional, (Streit e Johnston, 1976),



onde, $k_3^Q(v',v'')$ é o parâmetro que representa o decaimento da colisão de v' para v'' e Q são as moléculas, O_2 e N_2 , envolvidas neste processo.

3) pela remoção química,

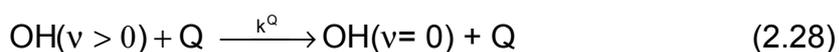


onde, Q pode ser o O_2 , N_2 ou O.

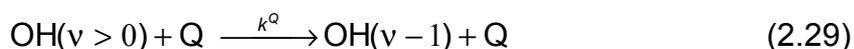
Como as medidas de laboratório feitas por Finlayson-Pitts e Kleindienst em 1981 e Greenblatt e Wiesenfeld em 1982 colocam em dúvida os valores dos coeficientes de desativação vibracional até então utilizados, surgiram dúvidas sobre a necessidade de uma fonte adicional para $\text{OH}(v' \leq 6)$ (Melo, 1994).

Com base em medidas feitas a partir do solo, McDade e Llewellyn (1987) utilizaram a distribuição vibracional da OH para tentar determinar qual deveria ser o coeficiente de desativação se a reação (2.24) fosse a única fonte química

da OH*. Dois modelos que restringem a excitação das bandas de Meinel devem ser considerados. No primeiro modelo definido como modelo de “morte súbita”, supõem-se que a remoção colisional da OH(v>0) não constitui uma fonte para outros níveis vibracionais da OH:



E o modelo alternativo da “cascata colisional” é suposto como sendo o modelo dominante:



onde a remoção colisional ocorre em passos de $\Delta v=1$.

Para determinar a consistência destas aproximações com os perfis de altitude, para níveis individuais de vibração, McDade et al. (1987) usaram simultaneamente medidas de foguetes para a emissão da OH(8,3) e o perfil de concentração do oxigênio atômico. Os coeficientes obtidos apresentam concordância estatística com os valores deduzidos de observações feitas em solo (Melo et al., 1997).

Utilizando medidas de foguetes na região equatorial, Melo et al. (1997) calcularam simultaneamente os perfis de emissão da OH(8,3), do O₂(0,0) e da concentração do oxigênio atômico. Os resultados para os modelos de “morte súbita” e “cascata colisional” são duas vezes menores comparados com os obtidos para altas latitudes por McDade et al. (1987). Esta diferença mostra a necessidade de um maior número de medidas observacionais para investigar a fotoquímica da OH.

A taxa de emissão volumétrica da OH(8,3), determinada por McDade et al., (1987), é dada pela equação:

$$V(8,3) = \frac{A(8,3) \cdot K_1 [H][O_3]}{L(8)} \cdot \left[f(8) + \frac{f(9) \{A(9,8) + \sum_Q K_3^Q(9,8)[Q]\}}{L(9)} \right] \quad (2.30)$$

Os cálculos para determinar a taxa de emissão volumétrica da OH(8,3) encontram-se mais detalhadas no Apêndice B.

O perfil de emissão volumétrica da OH(8,3) calculada por Takahashi et al. (1996) para região equatorial brasileira é apresentada na Figura 2.9. Observa-se que o pico de emissão da OH está entre de 85 e 87 km de altitude, apresentando uma largura na camada de emissão em torno de 7 km.

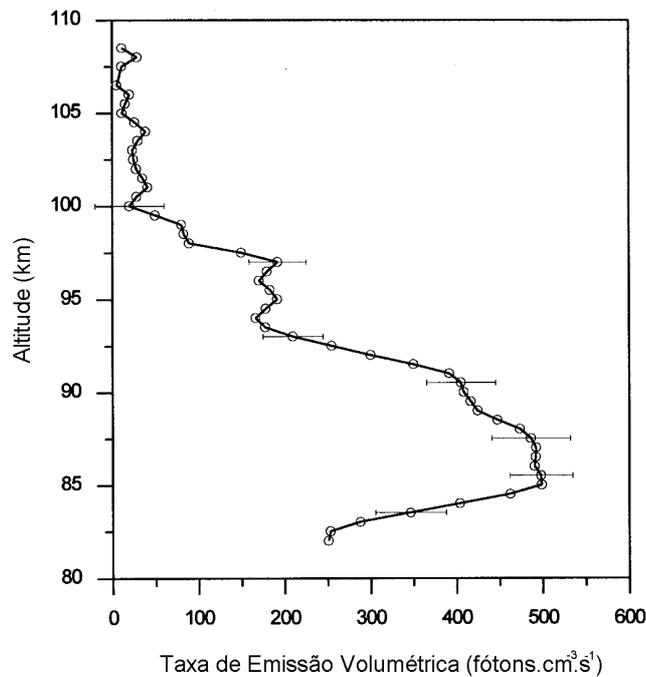


Fig. 2.9 - Perfil de emissão volumétrica da OH(8,3), obtida na região equatorial brasileira.

FONTE: Adaptada de Takahashi et al. (1996, p.1957).

CAPÍTULO 3

INSTRUMENTAÇÃO E REDUÇÃO DE DADOS

Uma das técnicas tradicionalmente empregadas na observação das emissões da aeroluminescência noturna é a fotometria. O fotômetro é um instrumento de alta sensibilidade usado para medir a intensidade de um fluxo de fótons (Kirchhoff, 1984).

Neste Capítulo serão descritos os fotômetros utilizados nas medidas observacionais de aeroluminescência, bem como o processo de calibração espectral, de sensibilidade absoluta dos equipamentos e os procedimentos usados na redução dos dados.

3.1 O FOTÔMETRO PORTÁTIL

O fotômetro portátil é um equipamento projetado para medir as principais linhas de emissão do ramo P da OH(8,3) a fim de determinar a temperatura na região da mesopausa. A estrutura externa do fotômetro projetado e construído no Laboratório LUME do INPE é apresentada na Figura 3.1.

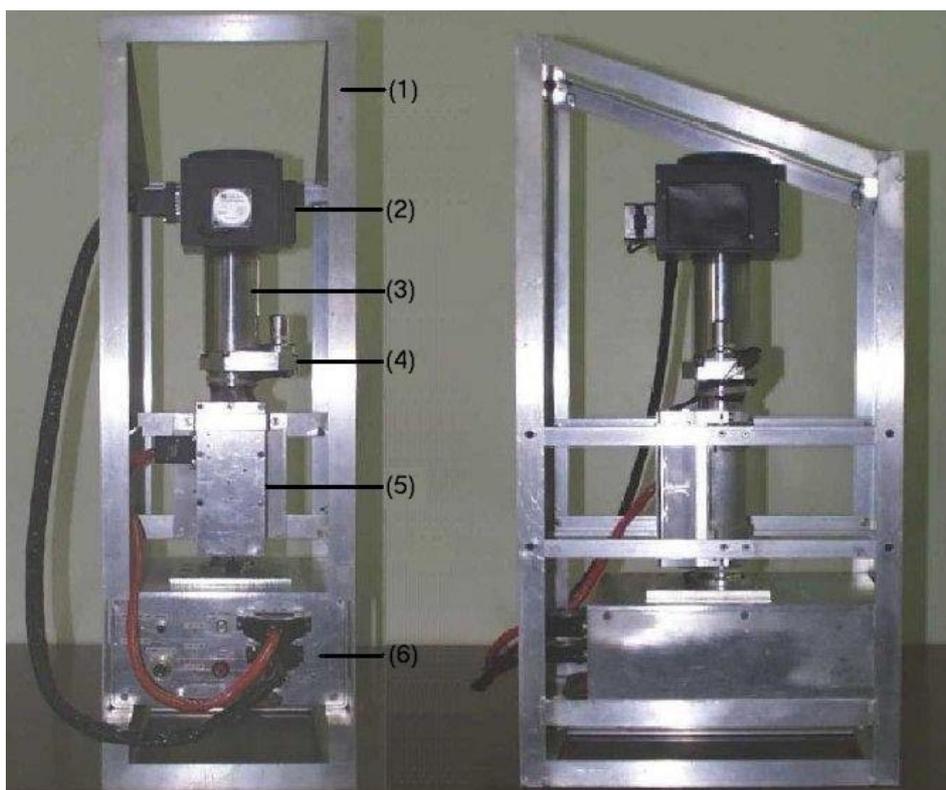


Fig. 3.1 - Estrutura externa do fotômetro portátil: (1) = rack interno; (2) = alojamento do filtro; (3) = colimador e lente; (4) = disco de calibração; (5) = tubo fotomultiplicador e eletrônica; (6) = unidade de controle.

As principais características do fotômetro são apresentadas na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – CARACTERÍSTICAS DO FOTÔMETRO PORTÁTIL

Dimensões do fotômetro (AxLxP)	70x30x45 cm
Campo de visão	2,5°
Comprimento de onda do filtro (λ_0)	741 nm
Largura de banda do filtro	1 nm
Tamanho do diafragma	2 x 8 mm ²
Distância focal da lente	9 cm
Varredura espectral	741-731 nm
Tempo de varredura espectral	23,5 s

O fotômetro portátil é composto por três partes: a unidade ótica, a unidade de controle e o sistema de controle e aquisição dos dados. A unidade ótica é constituída de: filtro de interferência inclinável, lente convergente, disco de calibração, diafragma e tubo fotomultiplicador.

O filtro de interferência determina a faixa de comprimento de onda a ser observado. O filtro empregado no fotômetro portátil possui um comprimento de onda central em torno de 741 nm e permite uma varredura espectral de 741 a 731 nm. Um motor de passos é usado para inclinar este filtro, em relação ao seu eixo ótico, obtendo uma varredura em relação ao comprimento de onda central. Assim, é possível medir as emissões da aeroluminescência e a radiação de fundo em cada região do espectro.

A relação entre o ângulo de inclinação, θ , e o deslocamento no comprimento de onda, $\Delta\lambda$, pode ser expressa pela relação de Eather e Reasoner (1969):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = -\frac{\theta^2}{2\mu^2} \quad (3.1)$$

onde, λ_0 é o comprimento de onda para $\theta = 0$, isto é, sem inclinação e μ é o índice de refração efetivo do filtro.

As variações na temperatura ambiente podem provocar um deslocamento no comprimento de onda da curva de transmissão do filtro de interferência. Eather e Reasoner (1969) estimaram este deslocamento em $0,25 \text{ \AA} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Para evitar esta influência, o filtro é mantido num alojamento com controle de temperatura em torno de $28 \pm 0,5^\circ \text{ C}$.

O fotômetro portátil possui um campo de visão total de $2,5^\circ$, com um diafragma retangular de $2 \times 8 \text{ mm}^2$ de abertura. O tamanho do diafragma e o posicionamento da lente convergente são responsáveis pelo campo de visão deste fotômetro.

Um parâmetro importante na determinação da intensidade da emissão da OH(8,3) é conhecer a variação da sensibilidade do fotômetro portátil ao longo da noite de observação. Para isto, foi projetado um disco de calibração, dotado de uma fonte de luz ativada pelo material radiativo trítio e um obturador, permitindo respectivamente monitorar a variação da sensibilidade e o ruído térmico do equipamento durante a observação.

O esquema óptico com diagrama de blocos do fotômetro portátil é apresentado na Figura 3.2.

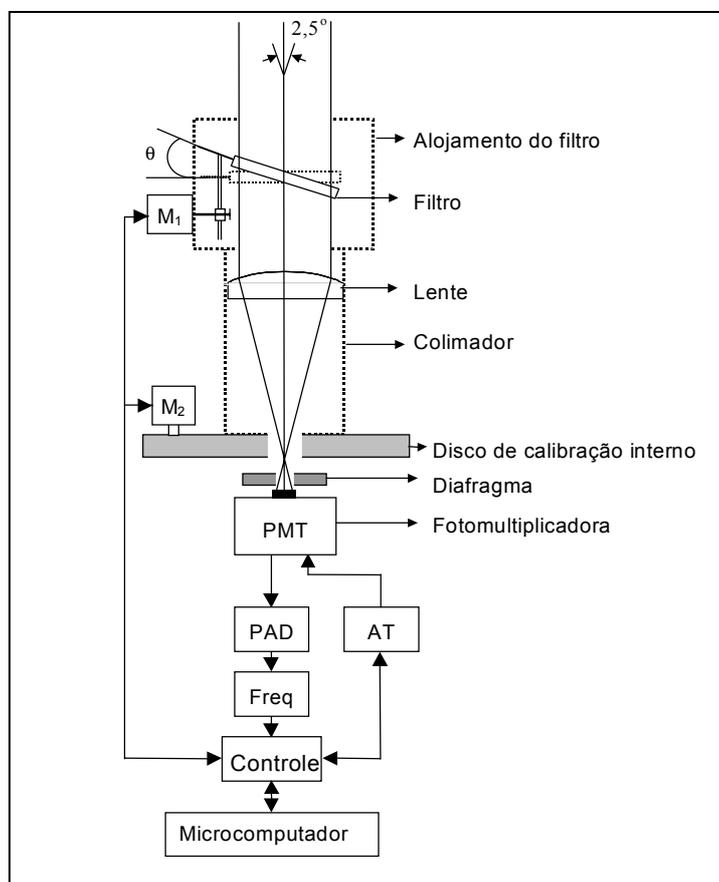


Fig. 3.2 - Esquema óptico e diagrama de blocos do fotômetro portátil.
 FONTE: Wrasse et al. (1999).

A unidade de controle comanda o funcionamento do fotômetro portátil como um todo, desde a alta tensão do tubo fotomultiplicador até o movimento do motor de passos na inclinação do filtro de interferência.

A metodologia do seu funcionamento é automática: a unidade de controle gerencia o movimento do motor de passos, M1 na Figura 3.2, o qual através de um disco faz o filtro de interferência inclinar. Esta inclinação é dada em relação ao plano normal do eixo ótico do filtro e possibilita uma varredura espectral em torno do comprimento de onda central do filtro. Ao final do curso do disco o filtro retorna à posição inicial.

O motor de passos possui uma resolução de $0,9^\circ$, que combinado com a geometria do disco permite 94 posições distintas de inclinação do filtro. Denominando estas posições de canais, o sistema fotômetro portátil possui 94 canais disponíveis para medir o espectro da OH.

O motor M2, da Figura 3.2, está ligado ao sistema de interface, que controla o disco de calibração e a cada 10 minutos executa uma calibração registrando as contagens da fonte de luz e o ruído térmico do equipamento.

Os fótons selecionados pelo sistema ótico atingem o cátodo do tubo fotomultiplicador, "PMT" da Figura 3.2, gerando foto-elétrons que são multiplicados 10^6 vezes pelos diodos do tubo dando origem a um pulso elétrico. O pulso elétrico passa através do pré-amplificador, "PAD" da Figura 3.2, e pelo sistema eletrônico de contagem, "Freq" da Figura 3.2. Em seguida o pulso é levado até o sistema de interface do equipamento, o qual está conectado num microcomputador que controla o funcionamento do fotômetro portátil e registra os valores detectados na observação.

Dois exemplos de arquivos, o primeiro ilustrando a forma como são gravados os dados e o segundo apresentando os resultados da determinação da intensidade e da temperatura da OH(8,3), são apresentados no Apêndice C.

Os dados observacionais registrados pelo fotômetro portátil são enviados via *internet* para o Laboratório LUME do INPE em São José dos Campos (SP), onde são posteriormente reduzidos e analisados.

A análise dos espectros observados e das curvas de transmissão obtidos no Laboratório LUME, em São José dos Campos, durante o período de calibração tornou possível avaliar o desempenho e determinar o filtro que apresentou as melhores características na região espectral de interesse observacional e o diafragma com a maior relação sinal/ruído e resolução para as observações.

Dois diferentes filtros de interferência foram usados na calibração e nas observações do espectro da aeroluminescência. Para cada um deles foram testados quatro diafragmas diferentes, os quais possuem as seguintes características: um diafragma circular com 3 mm de diâmetro de abertura e três diafragmas retangulares com aberturas respectivas de: 1x8 mm², 2x8 mm² e 3x8 mm².

3.1.1 Calibração do Fotômetro Portátil

Para estimar a intensidade de emissão da aeroluminescência noturna, deve-se conhecer e avaliar as características do instrumento usado. Utilizando como base o trabalho de calibração realizado por Melo et al. (1993), foi possível determinar os principais parâmetros utilizados nas medidas observacionais da aeroluminescência, tais como: a transmissão do filtro de interferência e a sensibilidade absoluta do equipamento, detalhados nas subseções seguintes.

3.1.1.1 Transmissão do Filtro

A resposta de um fotômetro ao detectar luz quase monocromática com intensidade ϕ_λ , pode ser expressa pela relação:

$$J_1(\lambda) = \varepsilon \cdot \eta(\lambda) \cdot T(\lambda) \cdot \phi_\lambda \cdot \Delta\lambda \quad (3.2)$$

onde, $J_1(\lambda)$ representa a resposta do fotômetro em contagens por segundo (c/s), ε é um fator instrumental, $\eta(\lambda)$ a eficiência da fotomultiplicadora, $T(\lambda)$ a transmissão do filtro em função do comprimento de onda e $\Delta\lambda$ é a resolução espectral do monocromador considerando uma fonte de luz monocromática.

Ao remover o filtro de interferência a resposta do fotômetro pode ser expressa pela equação:

$$J_2(\lambda) = \varepsilon \cdot \eta(\lambda) \cdot \phi_\lambda \cdot \Delta\lambda \quad (3.3)$$

Efetuada a divisão entre as Equações (3.2) e (3.3) determina-se a função de transmissão do filtro ou transmitância, $T=T(\lambda)$. Assim, a transmissão do filtro pode ser escrita pela equação:

$$T(\lambda) = \frac{J_1(\lambda)}{J_2(\lambda)} \quad (3.4)$$

A transmissão do filtro é obtida realizando-se uma varredura de 10 nm em torno do comprimento de onda a ser medido.

Para melhor avaliar as peculiaridades do filtro e poder comparar a transmissão em vários níveis de inclinação, determina-se a transmissão relativa $t(\lambda)$ deste filtro, pela equação:

$$t(\lambda) = \frac{T(\lambda)}{T_{\text{máx}}} \quad (3.5)$$

onde, $T_{\text{máx}}$ é obtida no pico da transmissão do filtro. Por conveniência, define-se outro parâmetro importante utilizado nas medidas de aeroluminescência, denominado largura efetiva do filtro, $\Delta\lambda_{\text{eff}}$. A largura efetiva do filtro expressa a área sob a curva de transmissão que pode ser definida pela relação:

$$\Delta\lambda_{\text{eff}} = \int t(\lambda) d\lambda \quad (3.6)$$

Para determinar as curvas de transmissão do filtro utilizou-se o monocromador do Laboratório LUME, modelo HR64-0 fabricado pela Jobin-Yvon, acoplado com uma rede holográfica de 1200 linhas.mm⁻¹ e resolução espectral, $\Delta\lambda$, de 0,01 nm. Este equipamento foi calibrado com uma lâmpada espectroscópica de

argônio, apresentando concordância estatística entre os comprimentos de onda registrados pelo monocromador e os emitidos pela lâmpada.

3.1.1.2 Sensibilidade Absoluta do Fotômetro

Após determinar as características do filtro de interferência, determina-se a sensibilidade absoluta do fotômetro. O procedimento experimental utilizado nesta calibração é esquematicamente ilustrado na Figura 3.3.

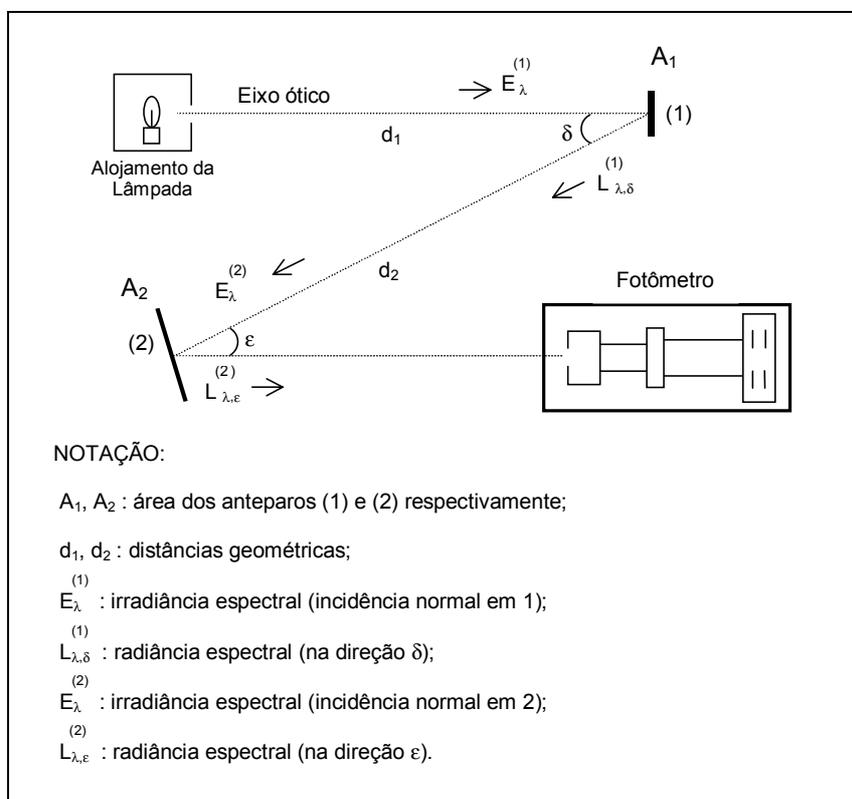


Fig. 3.3 - Montagem experimental usada para determinar a sensibilidade absoluta do fotômetro portátil do Laboratório LUME do INPE.
 FONTE: Adaptada de Melo et al. (1993, p.10).

A configuração geométrica da trajetória do raio luminoso na calibração do fotômetro portátil do Laboratório LUME do INPE foi baseada no trabalho de Yano e Kiyama (1975). No presente trabalho foram utilizadas duas lâmpadas

Eppley, modelos ES-8315 e ES-8928, fabricadas pela General Electric, como fontes de luz padrão para a calibração.

Para atenuar o sinal da lâmpada e simular uma fonte difusa como ocorre na atmosfera, são usados dois difusores de óxido de magnésio cuja refletância é tomada pelo valor constante de 0,98 (Kulkarni e Sanders, 1964). Este processo deve ser realizado numa sala totalmente escura, onde as únicas fontes de luz são os anteparos difusores da lâmpada padrão utilizada.

Os valores utilizados nesta montagem experimental são apresentados na Tabela 3.2. O valor da área, A_2 , do segundo difusor não é utilizado, porém, a área iluminada em A_2 deve ser maior que a área do feixe de luz incidente e maior que o campo de visão do fotômetro.

TABELA 3.2 – PARÂMETROS UTILIZADOS NA MONTAGEM EXPERIMENTAL DA SENSIBILIDADE ABSOLUTA DO FOTÔMETRO PORTÁTIL DO LABORATÓRIO LUME DO INPE

A_1	d_1	D_2	K	δ, ε
38,48 cm ²	211,4 cm	225,6 cm	0,98	30°

A radiância espectral L_λ , (W.cm⁻².sr⁻¹.nm⁻¹) que um difusor emite ao ser iluminado, com incidência normal, por uma fonte com irradiância espectral E_λ (W.cm⁻².nm⁻¹), pode ser expressa pela relação:

$$L_\lambda = \frac{K}{\pi} \cdot E_\lambda \quad (3.7)$$

onde, $K=K(\lambda,\theta)$ representa o fator de difusidade ou reflectância. Para os dois difusores utilizados, a radiância espectral pode ser expressa pelas equações:

$$L_{\lambda,\tilde{a}}^{(1)} = \frac{K_{\delta}^{(1)}}{\pi} \cdot E_{\lambda}^{(1)} \quad (3.8)$$

$$L_{\lambda,\varepsilon}^{(2)} = \frac{K_{\varepsilon}^{(2)}}{\pi} \cdot E_{\lambda}^{(2)} \quad (3.9)$$

Usando a lei de Lambert (Klein e Furtak, 1986) obtém-se a seguinte relação:

$$E_{\varepsilon}^{(2)} = L_{\varepsilon,\tilde{a}}^{(1)} \cdot \frac{A_1 \cdot \cos \tilde{a}}{d_2^2} \quad (3.10)$$

onde, A_1 e d_2 foram definidos na Figura 3.4. Substituindo a Equação (3.10) em (3.9) e considerando que $\delta = \varepsilon$, a radiância espectral pode ser expressa por:

$$L_{\tilde{a}}^{(2)} = E^{(1)} \cdot \frac{K^{(1)} \cdot K^{(2)}}{\pi^2} \cdot \frac{A_1 \cdot \cos \delta}{d_2^2} \quad (3.11)$$

O valor de $E_{\lambda}^{(1)}$ pode ser calculado usando as fontes de luz padrão, lâmpadas Eppley, cujas irradiâncias espectrais $E_{\lambda}^{(0)}$ são fornecidas pelo fabricante. Utilizando novamente a lei de Lambert, obtém-se:

$$E_{\lambda}^{(1)} = \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^2 \cdot E_{\lambda}^{(0)} \quad (3.12)$$

onde, d_0 é a distância padrão de medida, normalmente 50 cm, utilizada pelo fabricante da lâmpada e d_1 foi definida na Figura 3.4. Substituindo a Equação (3.11) em (3.12), obtém-se:

$$L_{\lambda,\tilde{a}}^{(2)} = \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^2 \cdot E_{\lambda}^{(0)} \cdot \frac{K^{(1)} \cdot K^{(2)}}{\pi^2} \cdot \frac{A_1 \cdot \cos \delta}{d_2^2} \quad (3.13)$$

Em Aeronomia é comum utilizar a unidade Rayleigh para medir radiância associada a aeroluminescência. Por convenção, adotou-se que $1 \text{ R} = 10^6$ fótons.cm⁻².s⁻¹.colunar (Chamberlain, 1961). Reescrevendo a Equação (3.13) em unidades Rayleigh e definindo B como sendo uma taxa de emissão aparente de aeroluminescência, a equação de conversão pode ser reescrita na seguinte forma:

$$B_{\lambda}^{(2)} = \frac{4\pi}{10^6} \cdot \frac{\lambda}{hc} \cdot L_{\lambda}^{(2)} \cong 6.328 \times 10^{10} \cdot \lambda \cdot L_{\lambda}^{(2)} \quad (3.14)$$

onde, h e c são, respectivamente, a constante de Planck e a velocidade da luz, sendo que o comprimento de onda, λ , no último termo deve ser expresso em nanômetros.

Assim, conhecido $B_{\lambda}^{(2)}$ determina-se a sensibilidade absoluta do fotômetro portátil, S em $R^{-1} \cdot s^{-1}$ ou $\text{contagens} \cdot R^{-1} \cdot s^{-1}$, para cada comprimento de onda desejado. Utilizando a Equação (3.2), define-se a sensibilidade absoluta como sendo expressa pela relação:

$$S(\lambda) = \frac{J(\lambda)}{B_{\lambda}^{(2)} \cdot \Delta\lambda_{\text{eff}}} \quad (3.15)$$

Os resultados obtidos no processo de calibração do fotômetro portátil do Laboratório LUME do INPE são fornecidos na Tabela 3.2. As colunas um e dois da Tabela 3.2, apresentam as linhas de emissão da OH(8,3), a radiação de fundo (Bg) e seus respectivos comprimentos de onda. A coluna três fornece a largura efetiva do filtro de interferência. As colunas quatro, cinco e seis apresentam as respostas do fotômetro para os três tipos de lâmpadas utilizadas na calibração.

Os parâmetros descritos a seguir foram calculados usando o programa Radiância (Gobbi, 1995a). Os valores da irradiância espectral, E_{λ}^0 , para cada comprimento de onda, colunas sete e oito da Tabela 3.2, foram calculados usando um polinômio de ajuste de ordem 9 a fim de interpolar os dados fornecidos pelo fabricante das lâmpadas padrões. As colunas compreendidas entre nove e doze da Tabela 3.2 apresentam a radiância (B_{λ}) para os diferentes tipos de lâmpadas utilizadas, ES-8315 e ES-8928, nas colunas treze e quatorze da Tabela 3.2 são apresentados os valores da sensibilidade absoluta do fotômetro portátil para os respectivos comprimentos de onda.

TABELA 3.2 - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO FOTÔMETRO PORTÁTIL DO LABORATÓRIO LUME DO INPE

Linha	λ	$\Delta\lambda_{\text{eff}}$	$J(\lambda)$			E^0_{λ}		B_{λ}		$B_{\lambda(L1)}$		S_{λ}	
			ES-8315	ES-8928	L1	ES-8315	ES-8928	ES-8315	ES-8928	ES-8315	ES-8928	ES-8315	ES-8928
P ₁ (3)	734,0	1,4	1182,0	1173,4	1828,1	22,8	22,4	376,2	369,9	581,8	576,25	2,2	2,2
P ₁ (4)	736,9	1,1	1419,3	1328,5	2099,1	22,9	22,5	379,8	373,3	561,6	589,9	3,3	3,2
Bg	738,2	0,9	1514,0	1354,4	2273,1	23,0	22,6	381,3	374,8	572,5	629,1	4,2	3,8
P ₁ (5)	740,2	0,8	1616,6	1546,5	2603,1	23,1	22,7	383,8	377,2	617,9	634,9	5,2	5,1
Unidades	nm	nm	Cont.s ⁻¹	Cont.s ⁻¹	Cont.s ⁻¹	W.cm ⁻³	W.cm ⁻³	R.nm ⁻¹	R.nm ⁻¹	R.nm ⁻¹	R.nm ⁻¹	R ⁻¹ .s ⁻¹	R ⁻¹ .s ⁻¹

3.1.2 Determinação da Temperatura Rotacional da OH(8,3)

A resposta do fotômetro portátil, ao observar uma região do espectro noturno, pode ser expressa pela relação:

$$J_{\iota} = B_{\iota} \cdot S_{\iota} + \int S_{\iota}(\lambda) \cdot G_{\iota}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3.16)$$

onde, B_{ι} representa a intensidade da linha ι observada, em R; $S_{\iota}(\lambda)$ a sensibilidade do fotômetro portátil para um dado comprimento de onda, em $R^{-1} \cdot s^{-1}$ e $G_{\iota}(\lambda)$ a intensidade espectral do contínuo da radiação de fundo, em $R \cdot nm^{-1}$. A integral representa a contagem total da radiação da luz contínua, luz de fundo, dentro da faixa de transmissão do filtro (Takahashi, 1981).

Usando a definição da largura efetiva do filtro, Equação (3.6), a Equação (3.16) pode ser aproximada e descrita pela relação:

$$J_{\iota} \cong B_{\iota} \cdot S_{\iota} + S_{\iota}(\lambda_{m\acute{a}x}) \cdot G(\lambda_{m\acute{a}x}) \cdot \Delta\lambda_{eff} \quad (3.17)$$

onde, as quantidades S_{ι} e G são calculadas para os comprimentos de onda situados no pico de transmissão do filtro. A transmissão relativa do filtro é igual a 1, isto é, $t(\lambda)=1$.

De acordo com a Equação (3.17) pode-se expressar a resposta do fotômetro portátil para as quatro posições de inclinação do filtro pelas equações:

$$J_1 = \sum_{\alpha} I_{\alpha} \cdot (S_1)_{\alpha} + G \cdot S_1 \cdot \Delta\lambda_{eff(1)} \quad (3.18)$$

$$J_2 = G \cdot (S_2)_{Bg} \cdot \Delta\lambda_{eff(2)} \quad (3.19)$$

$$J_3 = \sum_{\beta} I_{\beta} \cdot (S_3)_{\beta} + G \cdot S_3 \cdot \Delta\lambda_{eff(3)} \quad (3.20)$$

$$J_4 = \sum_{\gamma} I_{\gamma} \cdot (S_4)_{\gamma} + G \cdot S_4 \cdot \Delta\lambda_{eff(4)} \quad (3.21)$$

onde, $I_{\alpha,\beta,\gamma}$ é a intensidade das linhas, em Rayleigh, dentro das curvas de transmissão do filtro nas posições 1, 3 e 4; S_i é a sensibilidade do fotômetro portátil para as posições onde $i=1,2,3$ e 4 do filtro; a intensidade da radiação da luz contínua, G , é suposta constante dentro do intervalo de onda medido pelo fotômetro; $\Delta\lambda_{\text{eff}(i)}$ é a largura efetiva do filtro para as posições $i=1,2,3$ e 4.

O espectro teórico das linhas de emissão da OH(8,3) e as curvas de transmissão do filtro nas posições onde são medidas as linhas de emissão da molécula e a radiação da luz contínua são apresentados na Figura 3.4. Estas curvas foram obtidas durante o processo de calibração do fotômetro portátil, cada curva corresponde a uma inclinação do filtro.

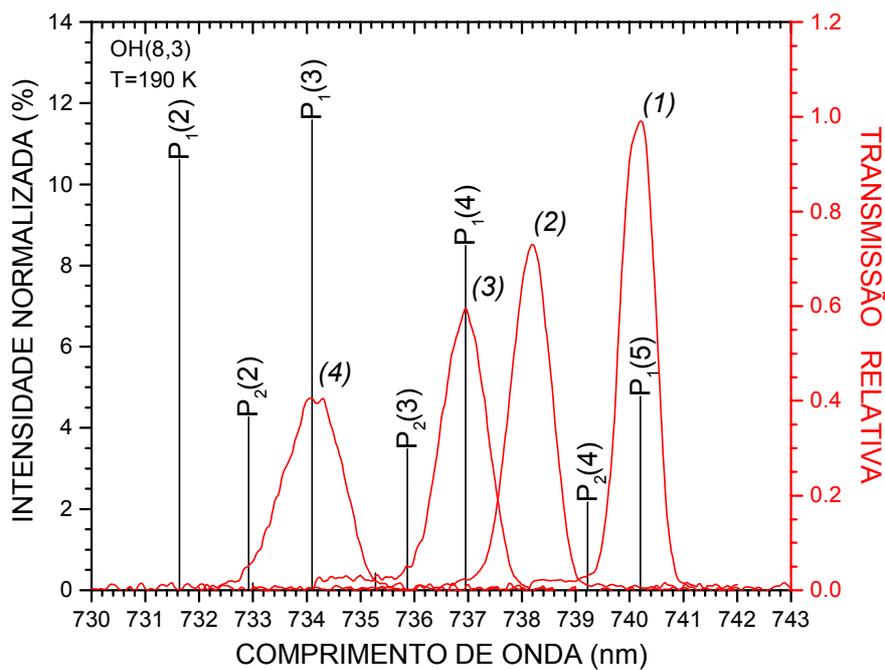


Fig. 3.4 - Espectro da OH(8,3) e as curvas de transmissões relativas do filtro do fotômetro portátil do Laboratório LUME do INPE. Os números entre parênteses referem-se às diferentes posições de inclinação do filtro.

Reescrevendo os termos da intensidade, I_k , das Equação (3.18) a (3.21) em função da intensidade normalizada, I'_k , e a intensidade total da banda, $I_{8,3}$, obtém-se:

$$I_k = I_{8,3} \cdot I'_k \quad (3.22)$$

para $k=\alpha, \beta$ e γ .

A sensibilidade para uma dada posição do filtro pode ser escrita como sendo:

$$(S_{1,3,4})_{\alpha, \beta, \gamma} = S_{1,3,4} \cdot (t_{1,3,4})_{\alpha, \beta, \gamma} \quad (3.23)$$

onde, t representa a transmissão relativa do filtro de interferência para as posições 1,3 e 4 nas linhas α, β e γ respectivamente.

Substituindo as Equações (3.19), (3.22) e (3.23) na Equação (3.18) obtém-se:

$$J_1 = S_1 \cdot \sum_{\alpha} I'_{\alpha} \cdot (t_1)_{\alpha} \cdot I_{8,3} + \frac{S_1 \cdot \Delta\lambda_{\text{eff}(1)}}{S_2 \cdot \Delta\lambda_{\text{eff}(2)}} \cdot J_2 \quad (3.24)$$

Procedendo da mesma forma para as Equações (3.19) e (3.20), obtém-se:

$$J_3 = S_3 \cdot \sum_{\beta} I'_{\beta} \cdot (t_3)_{\beta} \cdot I_{8,3} + \frac{S_3 \cdot \Delta\lambda_{\text{eff}(3)}}{S_2 \cdot \Delta\lambda_{\text{eff}(2)}} \cdot J_2 \quad (3.25)$$

$$J_4 = S_4 \cdot \sum_{\gamma} I'_{\gamma} \cdot (t_4)_{\gamma} \cdot I_{8,3} + \frac{S_4 \cdot \Delta\lambda_{\text{eff}(4)}}{S_2 \cdot \Delta\lambda_{\text{eff}(2)}} \cdot J_2 \quad (3.26)$$

Fazendo a divisão entre a Equação (3.24) e (3.26) obtém-se:

$$\frac{S_4}{S_1} \cdot \frac{J_1 - A_1 \cdot J_2}{J_4 - A_4 \cdot J_2} = \frac{\sum_{\alpha} I'_{\alpha} \cdot (t_1)_{\alpha}}{\sum_{\gamma} I'_{\gamma} \cdot (t_4)_{\gamma}} \quad (3.27)$$

onde, A_i representa fatores instrumentais,

$$A_i = \frac{S_i}{S_2} \cdot \frac{\Delta\lambda_{\text{eff}(i)}}{\Delta\lambda_{\text{eff}(2)}}, i=1,3,4 \quad (3.28)$$

Para calcular a temperatura rotacional da OH(8,3), utiliza-se a razão da intensidade entre duas linhas de emissão, como por exemplo, $P_1(5)/P_1(4)$, $P_1(5)/P_1(3)$ ou $P_1(4)/P_1(3)$. A temperatura rotacional calculada na presente Dissertação leva em conta a razão entre as linhas $P_1(5)$ e $P_1(3)$, sendo esta a mais sensível à variação da temperatura.

Utilizando então a Equação (3.27) define-se a relação teórica X como sendo:

$$X = \frac{\sum_{\alpha} I_{\alpha} \cdot (t_1)_{\alpha}}{\sum_{\gamma} I_{\gamma} \cdot (t_4)_{\gamma}} \quad (3.29)$$

Esta razão depende apenas da temperatura rotacional da molécula OH. Calcula-se uma função de ajuste inversa do tipo polinomial de grau p, tal que:

$$T = T(X) = \sum_{n=0}^p a_n \cdot (X)^n \quad (3.30)$$

A partir dos dados observados (J_i) e dos fatores instrumentais (A_i), obtém-se:

$$X_{\text{Obs}} = \frac{S_4}{S_1} \cdot \frac{J_1 - A_1 \cdot J_2}{J_4 - A_4 \cdot J_2} \quad (3.31)$$

Aplicando-se X_{Obs} na função de ajuste, Equação (3.30), determina-se a temperatura rotacional da OH(8,3), como sendo:

$$T = T(X_{\text{Obs}}) = \sum_{n=0}^p a_n \cdot (X_{\text{Obs}})^n \quad (3.32)$$

onde, a_n é o coeficiente do polinômio.

3.1.3 Determinação da Intensidade de Emissão da OH(8,3)

A intensidade de emissão da molécula OH(8,3), pode ser obtida através da observação de uma das linhas: P₁(5), P₁(4) ou P₁(3). As Equações (3.18), (3.20) e (3.21) permitem determinar estes valores observacionais.

A linha de emissão P₁(4) foi utilizada para calcular a intensidade de emissão da OH(8,3), de acordo com a Equação (3.20). Esta linha apresenta pouca variação em função do aumento da temperatura, assim, obtém-se:

$$I_{8,3} = \frac{J_3 - A_3 \cdot J_2}{S_3 \cdot \sum_{\hat{a}} I_{\hat{a}} \cdot (t_3)_{\hat{a}}} \quad (3.33)$$

Para determinar o valor do termo $\sum_{\hat{a}} I_{\hat{a}} \cdot (t_3)_{\hat{a}}$ da Equação (3.33), define-se uma função teórica Y, tal que:

$$Y = \sum_{\hat{a}} I_{\hat{a}} \cdot (t_3)_{\hat{a}} \quad (3.34)$$

Ao variar a temperatura T determina-se uma função de ajuste polinomial de grau q, tal que:

$$Y = Y(T) = \sum_{n=0}^q b_n \cdot T^n \quad (3.35)$$

onde, b_n é o coeficiente do polinômio.

Utilizando os valores da temperatura, T, calculados pela Equação (3.32), determina-se Y_{Obs}. Os demais termos da Equação (3.33) dependem apenas dos fatores instrumentais (A₃ e S₃) e dos dados observados (J₃ e J₂) podendo ser determinado o valor da intensidade de emissão da OH(8,3). As principais linhas de emissão da OH(8,3), medidas pelo fotômetro portátil do Laboratório LUME do INPE, em função da temperatura são apresentadas na Figura 3.5-A.

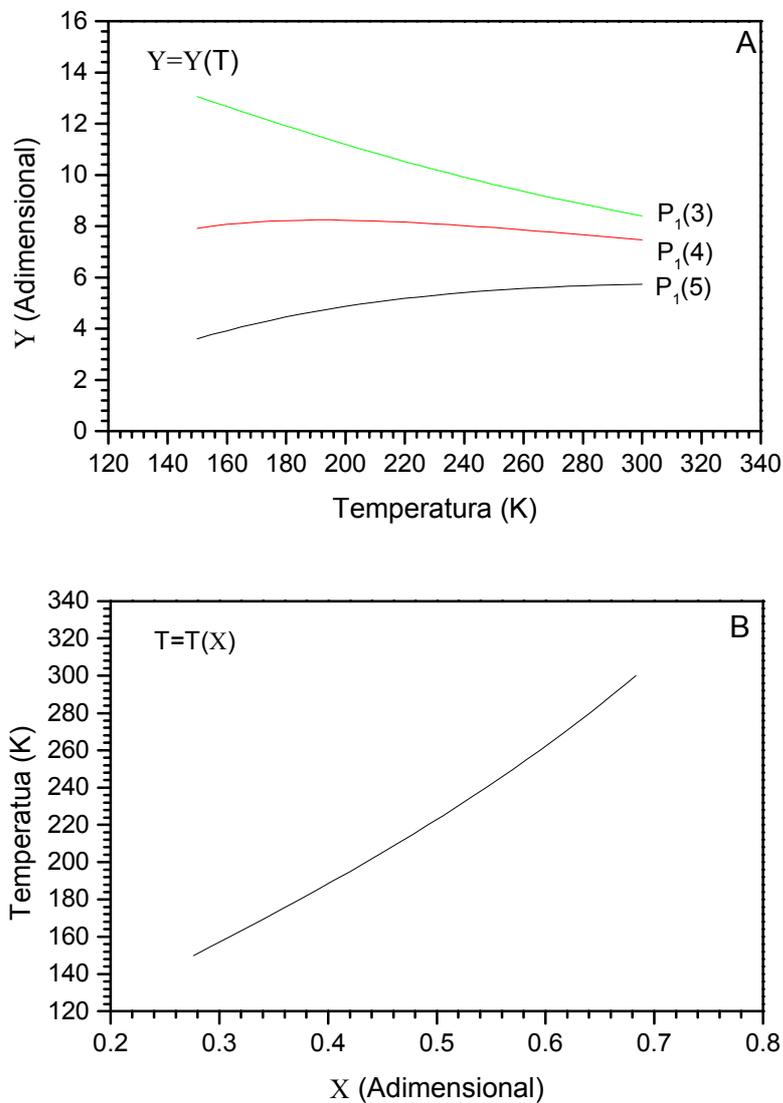


Fig. 3.5 - Ajustes polinomiais utilizados para determinar a intensidade de emissão e a temperatura rotacional da molécula OH(8,3).

Observa-se na Figura 3.5 que as linhas $P_1(3)$ e $P_1(5)$ são mais sensíveis à variação da temperatura e a razão entre elas fornece uma relação quase linear, Figura 3.5-B. Utilizando um ajuste polinomial na Figura 3.5-B determinou-se a temperatura rotacional da molécula OH(8,3).

3.1.4 Confiabilidade e Precisão das Medidas

O erro na determinação da intensidade de emissão e da temperatura rotacional da OH(8,3) resulta da propagação de erros inerentes aos processos de medição na observação.

Estes erros podem ser classificados em sistemáticos e aleatórios. Os erros sistemáticos estão presentes nos cálculos dos seguintes fatores: sensibilidade, transmissão relativa do filtro e largura efetiva do filtro, como fatores experimentais, e na intensidade das linhas de emissão, como fator teórico. Os erros aleatórios são devido às flutuações aleatórias das contagens registradas pelo fotômetro.

Os erros sistemáticos e aleatórios são descritos com mais detalhes nas seções subsequentes.

3.1.4.1 Erros Associados aos Fatores Experimentais

A determinação da sensibilidade absoluta do fotômetro portátil em laboratório é uma experiência crítica envolvendo várias grandezas físicas e geométricas, cujas incertezas nem sempre são bem conhecidas. Uma estimativa do erro sistemático na calibração da lâmpada padrão produz uma margem de erro não superior a 5%.

A temperatura rotacional da OH(8,3) depende da razão entre as sensibilidades de duas inclinações diferentes do filtro, de forma que a ocorrência de um pequeno erro sistemático na calibração do instrumento é diluído na determinação final da temperatura (Gobbi, 1993).

A curva de transmissão do filtro foi determinada com uma precisão de 0,1 nm em comprimento de onda, sendo suficiente para um filtro que possui uma largura de banda em torno de 1 nm.

O cálculo da largura efetiva do filtro, $\Delta\lambda_{\text{eff}(k)}$, para cada posição de medida, foi obtido utilizando-se o programa Transmitância (Gobbi, 1995b) e o programa de análise de dados Origin 5.0. Determinou-se uma diferença de 2,5% nos resultados obtidos por estes dois programas, isto porque o programa Transmitância utiliza os 10 primeiros e os 10 últimos valores da curva de transmissão do filtro como linha de base para subtrair o ruído do equipamento. O mesmo não acontece com o programa Origin 5.0, onde este procedimento é feito visualmente, não obtendo exatamente o mesmo parâmetro a cada inspeção.

Uma estimativa no erro sistemático devido à transmissão do filtro e a sensibilidade absoluta do fotômetro foi realizada, resultando numa margem de erro não superior a $\pm 6\%$ e $\pm 2,5$ K para os valores de intensidade de emissão e temperatura rotacional da OH(8,3).

3.1.4.2 Erros Associados aos Fatores Teóricos

Considerando a validade da distribuição de Boltzmann para calcular a temperatura rotacional da OH, estes valores são sensíveis aos parâmetros espectroscópicos usados nos cálculos das intensidades normalizadas (Gobbi, 1993). Considerando a emissão da OH(8,3), diferentes coeficientes de Einstein conduzem a diferenças significativas, de até 14 K, nos resultados da temperatura rotacional e de 8% na intensidade de emissão.

3.1.4.3 Erros Aleatórios Associados às Medidas de Intensidade e Temperatura

Na determinação da intensidade e temperatura da OH(8,3), as Equações (3.32) e (3.35) foram usadas para avaliar a propagação de erros associados aos parâmetros discutidos anteriormente. Os erros aleatórios associados aos cálculos da intensidade e temperatura são de $\pm 5\%$ e ± 5 K. Estes erros foram obtidos utilizando-se o desvio padrão de um conjunto de medidas

observacionais da intensidade de emissão e da temperatura rotacional calculada.

3.1.5 Programa de Aquisição dos Dados

Utilizando o sistema operacional Windows 98 e a linguagem de programação Visual Basic 5.0 foi possível o desenvolvimento do programa para a aquisição dos dados e o controle do fotômetro portátil. Esta linguagem de programação é de uso comum no Laboratório LUME, possuindo interface gráfica que permite o monitoramento das observações.

A Figura 3.6 apresenta a janela de aquisição dos dados do programa desenvolvido para o fotômetro portátil. O sistema foi desenvolvido para permitir que o operador monitore em tempo real as medições de aeroluminescência feitas pelo equipamento.

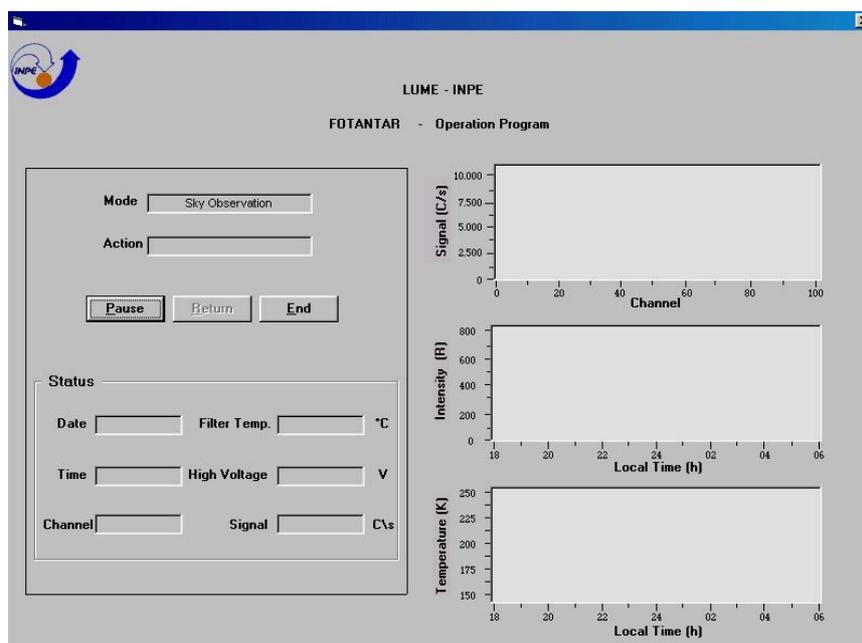


Fig. 3.6 - Janela principal do programa que permite a visualização da aquisição dos dados e o monitoramento da intensidade e da temperatura da OH(8,3).

A janela da Figura 3.6 apresenta a possibilidade de, simultaneamente, serem mostrados três gráficos que permitem visualizar: as contagens registradas pelo

equipamento em cada canal do filtro, a temperatura e a intensidade da OH(8,3) determinada pelas Equações (2.32) e (2.35). Também é possível monitorar a hora do sistema e a temperatura do filtro que é mantida em torno de 28° C.

A cada dez minutos, aproximadamente, o fotômetro portátil realiza uma calibração para monitorar a variação da sensibilidade e o ruído térmico do equipamento. O programa permite ao operador programar o dia, a hora de início e término das observações.

A Figura 3.7 apresenta o espectro noturno obtido durante a noite de 12/08/99 no Laboratório LUME do Centro Espacial de Cachoeira Paulista (SP). Este espectro foi obtido com um tempo de exposição observacional de aproximadamente quatro minutos, eqüivalente a integração de dez varreduras do filtro. Observa-se claramente as três regiões onde são medidas as linhas $P_1(5)$, $P_1(4)$ e $P_1(3)$.

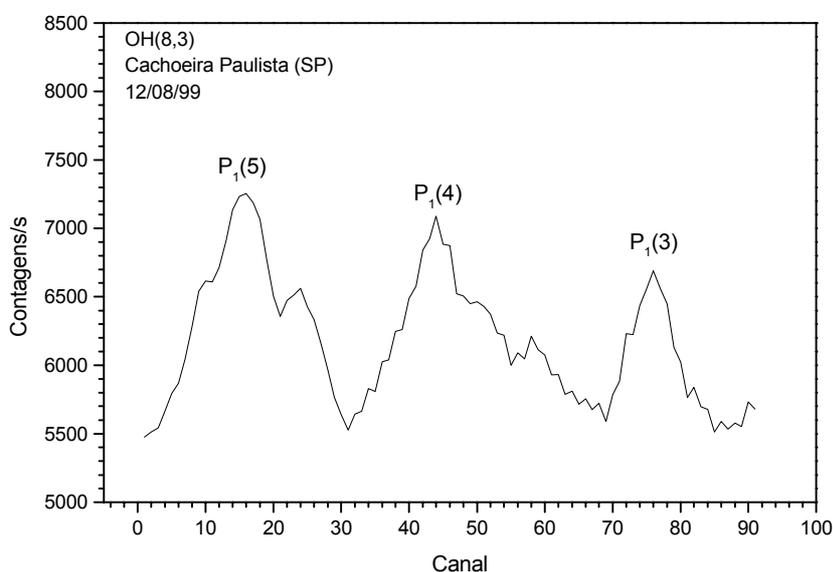


Fig. 3.7 - Espectro noturno obtido no Centro Espacial de Cachoeira Paulista (SP) durante a noite de 12/08/99.

Juntamente com o programa de aquisição dos dados foi desenvolvido um programa para a redução dos dados, isto é, a determinação da temperatura rotacional e da intensidade de emissão da OH(8,3). No Apêndice C são apresentados dois exemplos dos arquivos gerados por estes programas.

3.2 O FOTÔMETRO MULTI2

O fotômetro MULTI2, multicanal 2, é um equipamento mais complexo e com uma estrutura maior, comparado ao fotômetro portátil. Isto porque o fotômetro MULTI2 apresenta cinco filtros de interferência para observações das emissões de aeroluminescência, possuindo um sistema de refrigeração para o sistema fotomultiplicador. Este instrumento, apresentado esquematicamente na Figura 3.8, segue os mesmos princípios de funcionamento descritos para o fotômetro portátil do Laboratório LUME do INPE, permitindo que se faça apenas uma breve descrição técnica de sua operação.

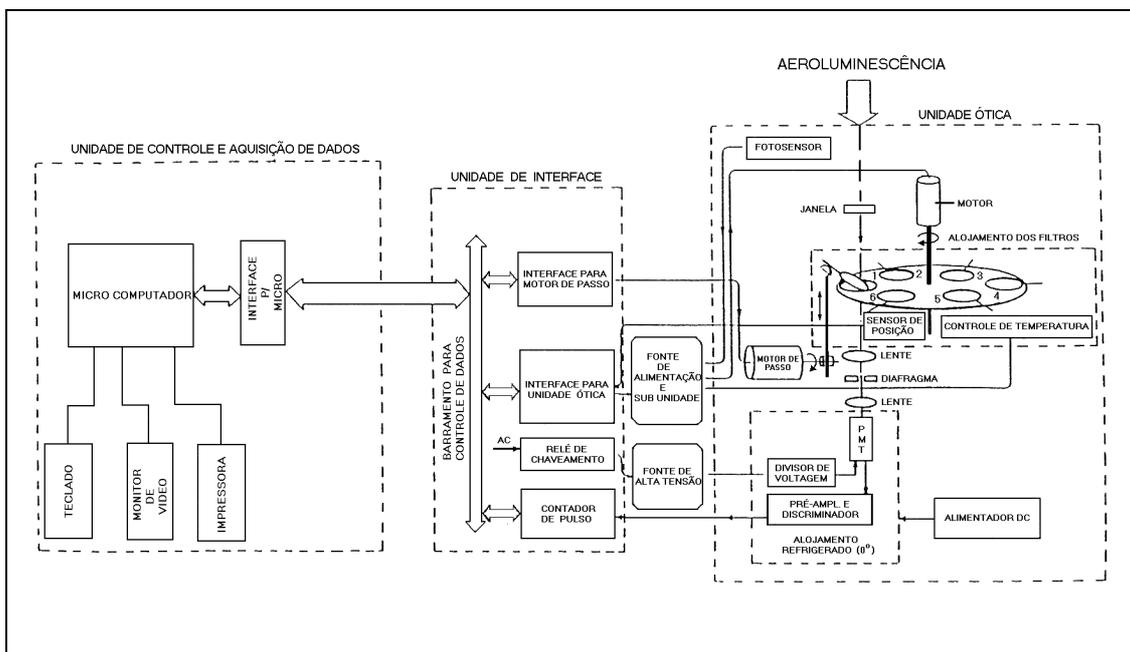


Fig. 3.8 - Estrutura e diagrama de blocos do fotômetro MULTI2 do Laboratório LUME do INPE.
 FONTE: Adaptada de Melo et al. (1993, p.4).

O fotômetro MULTI2 destina-se a medir as emissões da aeroluminescência do oxigênio atômico, linha verde e vermelha; do sódio mesosférico; da hidroxila, OH(6,2) e do oxigênio molecular, O₂(0,1). O diagrama de blocos do MULTI2 é esquematizado em três unidades básicas: a unidade ótica, a unidade de interface e a unidade de aquisição e controle do equipamento, apresentado na Figura 3.8.

A unidade ótica consiste em um disco contendo cinco filtros de interferência que determinam, cada um, uma faixa de comprimento de onda e um obturador opaco, usado para medir o ruído térmico, uma lente e um diafragma que determinam o campo de visão, um tubo fotomultiplicador e os instrumentos eletrônicos que registram os sinais. O fotômetro possui um campo de visão total de dois graus, e um diafragma circular de 50 mm de diâmetro.

Os cinco filtros de interferência permitem observar a aeroluminescência em diferentes regiões do espectro. Quando um dos filtros é posicionado no caminho ótico, um motor de passo permite inclinar o filtro possibilitando varreduras em comprimento de onda. Cada inclinação possibilita uma varredura de 8.0 nm a partir do comprimento de onda central do filtro de interferência.

A Tabela 3.3 apresenta as características dos cinco filtros empregados nas observações da aeroluminescência terrestre onde a primeira coluna apresenta o filtro de interferência usado, as colunas dois três e quatro representam respectivamente o número de posições de inclinação do filtro, o comprimento de onda de cada inclinação e a largura efetiva do filtro nestas posições. As colunas cinco, seis e sete apresentam, respectivamente, a contagem registrada pelo fotômetro usando a lâmpada Eppley ES-8315, a radiância espectral e a sensibilidade do fotômetro em cada posição de medida.

TABELA 3.3 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO FOTÔMETRO MULTI2 DO LABORATÓRIO LUME DO INPE

Filtro	Posição	λ	$\Delta\lambda_{\text{eff}}$	J(λ) ES-8315	B $_{\lambda}$ ES-8315	S ES-8315
F#1	P1	557,7	1,6	8947	169,60	32,2
	P2	554,0	1,8	7995	164,50	27,3
F#2	P1	589,1	1,7	12161	215,16	33,4
	P2	586,6	2,8	11215	211,34	27,4
	P3	583,8	2,1	10797	207,16	24,7
F#3	P1	630,0	1,7	6544	278,65	13,4
	P2	627,0	1,8	6018	273,89	12,4
F#4	P1	777,5	1,3	12693	501,31	19,8
	P2	775,1	1,6	12026	498,30	14,7
	P3	771,5	2,0	11812	493,52	12,1
	P4	768,5	2,1	11555	488,66	11,0
F#5	P1	868,0	1,5	14618	601,00	16,5
	P2	866,0	1,4	14282	599,09	16,6
	P3	857,2	2,0	13045	591,06	10,9
<i>Unidades</i>	-	<i>nm</i>	<i>nm</i>	<i>Cont.s⁻¹</i>	<i>R.nm⁻¹</i>	<i>R.s⁻¹</i>

FONTE: Melo et al. (1993, p.13).

A relação entre o ângulo de inclinação e o deslocamento do comprimento de onda é discutida na Seção 3.1, Equação (3.1). Quando terminada a varredura, o disco gira posicionando outro filtro no caminho ótico. Ao final, são necessários aproximadamente 3,3 minutos para uma seqüência completa de medidas com os cinco filtros e o obturador.

Assim como no fotômetro portátil, o alojamento dos filtros do MULTI2 é mantido sob um controle de temperatura em $28\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, a fim de evitar um deslocamento em comprimento de onda da curva de transmissão do filtro de interferência. O tubo fotomultiplicador possui um sistema próprio de refrigeração para manter a temperatura inferior a 0°C e minimizar o ruído térmico do fotômetro MULTI2.

A unidade de interface controla o sistema ótico do fotômetro. A unidade de controle e aquisição de dados do MULTI2 consiste de um micro computador e uma unidade padrão de interface para acoplamento com computador. Os dados são registrados em disco rígido e transferidos via *internet* para o Laboratório LUME do INPE em São José dos Campos (SP), onde são processados e posteriormente analisados.

CAPÍTULO 4

OBSERVAÇÕES E RESULTADOS

As observações da emissão da OH(8,3) foram realizadas durante os meses de agosto a novembro de 1999, utilizando o fotômetro portátil, no Laboratório LUME do Centro Espacial de Cachoeira Paulista (SP) que localiza-se nas coordenadas geográficas 22,7° Sul e 45,0° Oeste. Neste capítulo são fornecidos os resultados das determinações das intensidades e temperaturas da OH(8,3) observados no período.

4.1 COLETA DE DADOS

O fotômetro portátil foi instalado no Laboratório LUME no dia 06 de agosto de 1999, e nesta noite iniciaram-se as observações da aeroluminescência da OH(8,3). As medidas fotométricas foram realizadas durante duas semanas por mês, no período de lua nova. As observações iniciaram uma hora após o pôr do sol e acabaram uma hora antes do sol nascer. Nos meses em que ocorreram as observações, o fotômetro portátil operou nas noites que apresentavam céu aberto, isto é, sem cobertura de nuvens.

Durante os quatro meses de observações, foram realizadas 24 noites de medidas, sendo que 19 delas foram utilizadas neste trabalho pois possuem mais de três horas de medidas ininterruptas. As demais noites apresentaram dados comprometidos, basicamente devido à cobertura efetiva do céu, por nuvens, impossibilitando as observações da aeroluminescência da OH, isto porque a região do espectro próximo ao infravermelho é sensível às condições do céu.

O período total de observação durante cada noite em que ocorreram as medidas entre agosto e novembro de 1999, é apresentado na Figura 4.1. Observa-se que durante os meses de agosto e setembro houve o maior número de noites contendo mais horas em que ocorreram as observações da aeroluminescência. No mês de outubro as condições climáticas não foram favoráveis e apenas três noites de observações foram realizadas, contendo cada uma menos de 5 horas de medidas.

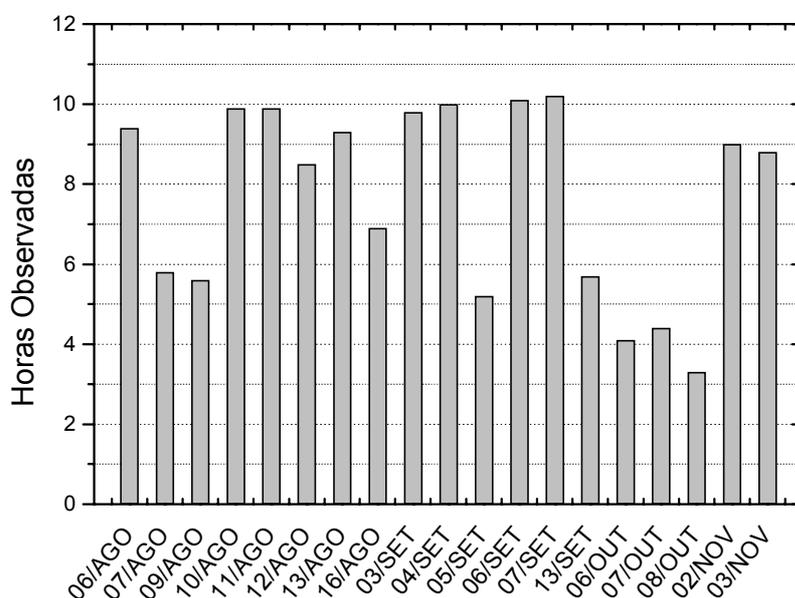


Fig. 4.1 - Número de horas observadas por noite com medidas efetivas utilizando-se o fotômetro portátil no Laboratório LUME do Centro Espacial de Cachoeira Paulista - INPE.

Na Figura 4.2 são apresentadas as médias noturnas da intensidade de emissão e temperatura rotacional da OH(8,3) que foram calculadas utilizando os coeficientes de Einstein de Langhoff et al. (1986). Observa-se que a média noturna da intensidade de emissão do período foi de 340 R variando de 220 a 540 R e a média noturna da temperatura rotacional foi de 208 K com variação de 190 a 230 K.

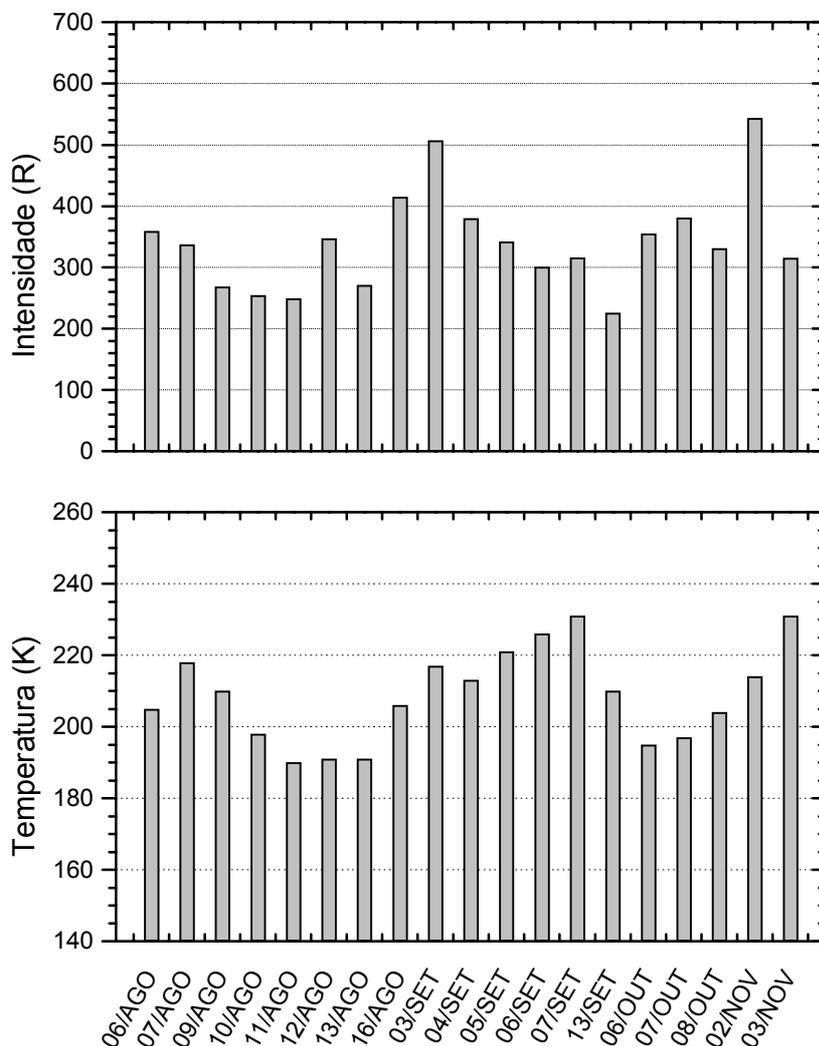


Fig. 4.2 - Médias noturnas da intensidade e temperatura da OH(8,3) efetuada com o fotômetro portátil, no Laboratório LUME do Centro Espacial de Cachoeira Paulista - INPE.

A Tabela 4.1 apresenta os valores médios, mínimos e máximos da intensidade de emissão e da temperatura rotacional da OH(8,3) incluindo todas as noites em que foram possíveis as observações da emissão de aeroluminescência com o fotômetro portátil do Laboratório LUME no Centro Espacial de Cachoeira Paulista do INPE.

TABELA 4.1 – MÉDIAS DAS INTENSIDADES DE EMISSÕES E TEMPERATURAS ROTACIONAIS DA OH(8,3) EFETUADAS COM O FOTÔMETRO PORTÁTIL DO LABORATÓRIO LUME NO CENTRO ESPACIAL DE CACHOEIRA PAULISTA DO INPE

OH(8,3)	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Intensidade (R)	358,8	116,8	150	855
Temperatura (K)	210,7	19,4	162	274

A Figura 4.3 apresenta a distribuição da intensidade de emissão da OH(8,3) em função da temperatura rotacional da molécula para todas as noites de observações, cada ponto na figura representa um valor de intensidade e de temperatura medido em um intervalo de aproximadamente quatro minutos. Nota-se pelas médias apresentada na Tabela 4.1 que a maior distribuição da intensidade de emissão é em torno de 358 R, para uma temperatura rotacional média de 210 K. Percebe-se que um aumento nos valores da temperatura nem sempre acarretam um aumento da intensidade de emissão.

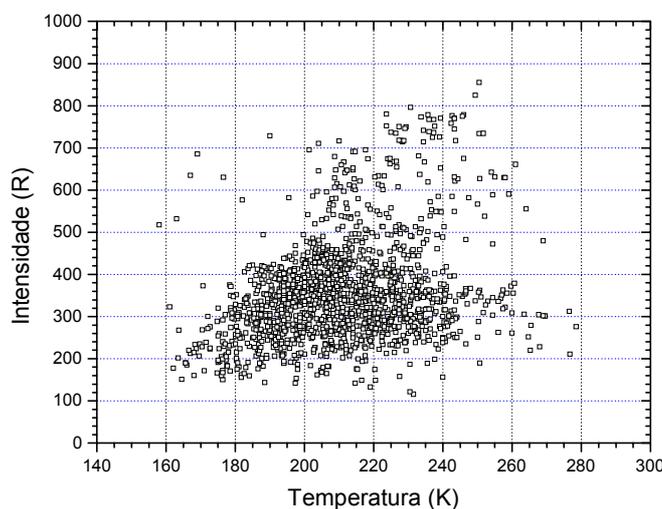


Fig. 4.3 - Intensidade de emissão em função da temperatura rotacional da OH(8,3) para todas as noites de observação com o fotômetro portátil no Laboratório LUME do Centro Espacial de Cachoeira Paulista - INPE.

A temperatura rotacional da OH(8,3) observada representa a temperatura da atmosfera na região da mesopausa, região em torno de 85 km de altitude.

4.2 VARIAÇÕES NOTURNAS DA INTENSIDADE E TEMPERATURA DA OH(8,3)

A intensidade de emissão e a temperatura rotacional da OH(8,3) foram calculadas usando os métodos apresentados no Capítulo 3. Para cada noite de observação realizou-se uma suavização estatística dos dados, média móvel de três pontos, nos valores de intensidade e de temperatura.

Os resultados da determinação da intensidade e da temperatura para as principais noites de observações são apresentados a seguir. As figuras que mostram os resultados são formadas por dois gráficos: no primeiro gráfico de cada noite são apresentados os resultados da intensidade de emissão e a radiação de fundo, em Rayleigh. No segundo gráfico é apresentada a temperatura rotacional da OH(8,3), em Kelvin.

A escala temporal destas figuras estende-se das 18 às 06 horas da manhã do dia seguinte, sendo adotado um horário contínuo após a meia noite. Adotou-se então a escala temporal das 18 às 30 horas para facilitar a análise dos resultados e a confecção dos gráficos na apresentação dos resultados observacionais. Alguns exemplos das variações noturnas são apresentados a seguir.

A Figura 4.4 apresenta as observações realizadas durante a noite de 06.08.99 com 9 horas de observações da aeroluminescência terrestre. A intensidade de emissão apresentou uma variação de 300 a 500 R durante a noite e um comportamento ondulatório após a meia noite. A temperatura observada apresenta uma queda de 235 K, às 21:00 hora local, para 180 K, às 28:00 hora local.

Os erros aleatórios, devido às flutuações das contagens dos sinais do fotômetro, são mostradas no gráfico com barras verticais. Nota-se que os erros aleatórios da temperatura são maiores que os previstos no Capítulo 3 seção 3.1.4 – Confiabilidade e Precisão das Medidas, devido ao baixo nível de sensibilidade do fotômetro portátil. As oscilações da temperatura rotacional da OH(8,3) de curto período de tempo, menores que 1 hora, portanto, não devem ser consideradas significantes.

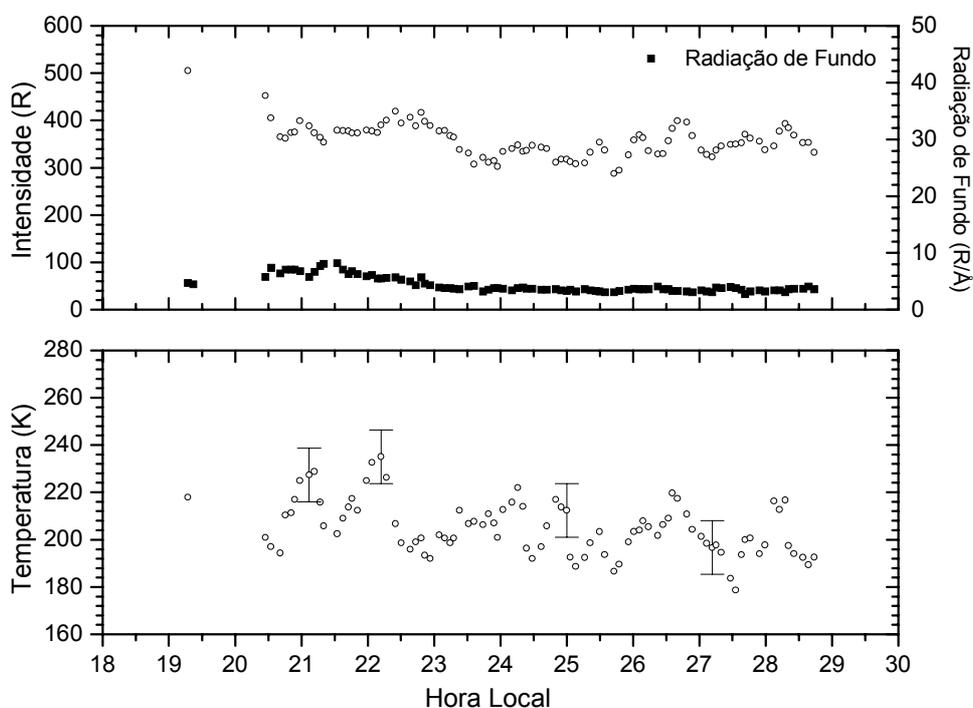


Fig. 4.4 - Intensidade e temperatura da molécula OH(8,3) observadas na noite de 06.08.99 com o fotômetro portátil do Laboratório LUME no Centro Espacial de Cachoeira Paulista – INPE.

A Figura 4.5 apresenta as medidas observacionais efetuadas durante a noite de 10.08.99, com aproximadamente 10 horas de observações. Esta noite apresenta algumas características ondulatórias antes da meia noite, e um

mínimo de intensidade de emissão em torno das 26,5 horas. Tanto a temperatura quanto a intensidade de emissão apresentaram uma queda em relação à noite anterior, ficando o mínimo e máximo da temperatura entre 170 e 230 K e da intensidade de emissão entre 140 e 380 R.

Os resultados da noite de 11.08.99 são apresentados na Figura 4.6, onde ocorreram 10 horas de observações. Nota-se claramente um comportamento ondulatório, entre 20:00 e 22:00 hora local, tanto na intensidade de emissão quanto na temperatura rotacional com um período de aproximadamente 1 hora. Neste período a variação da temperatura parece estar adiantada à intensidade de emissão. Esta noite apresentou características idênticas à noite anterior, e os valores máximos e mínimos da intensidade de emissão e temperatura rotacional são praticamente os mesmos.

Na Figura 4.7 são apresentados os resultados obtidos na noite de 12.08.99, com 8,5 horas de observações. A temperatura apresentou a mesma variação noturna observada na noite de 11.08.99 e a intensidade de emissão, por sua vez, mostrou um aumento, ficando o mínimo e o máximo em 256 e 439 R, respectivamente. Observa-se também um comportamento ondulatório tanto antes como após a meia noite.

Os resultados da noite de 13.08.99 são apresentados na Figura 4.8 onde se observa um pequeno comportamento ondulatório na intensidade de emissão e uma grande dispersão nos valores da temperatura rotacional devido ao erro aleatório. A intensidade de emissão apresentou uma queda em relação à noite anterior e a temperatura manteve-se no mesmo intervalo.

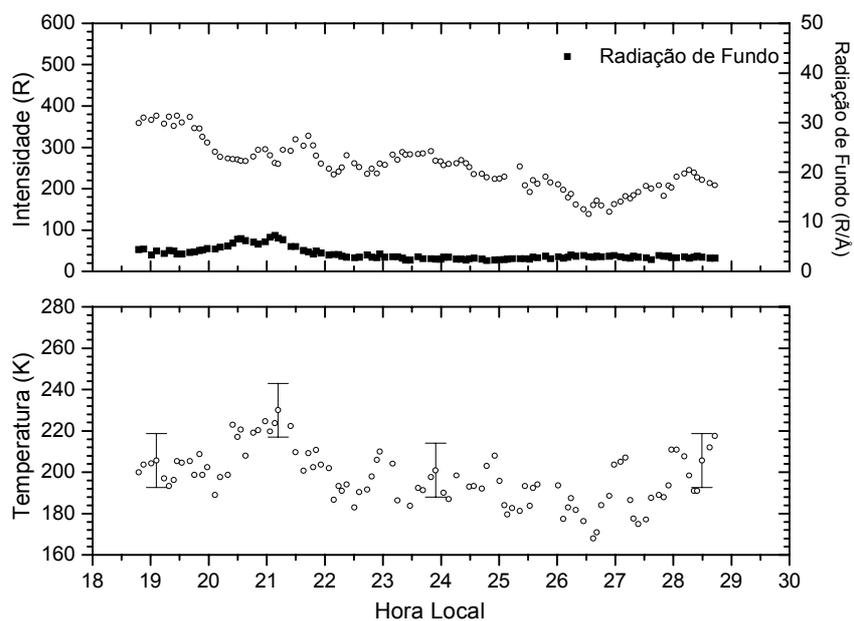


Fig. 4.5 - Intensidade e temperatura da molécula OH(8,3) observadas na noite de 10.08.99 com o fotômetro portátil do Laboratório LUME no Centro Espacial de Cachoeira Paulista – INPE.

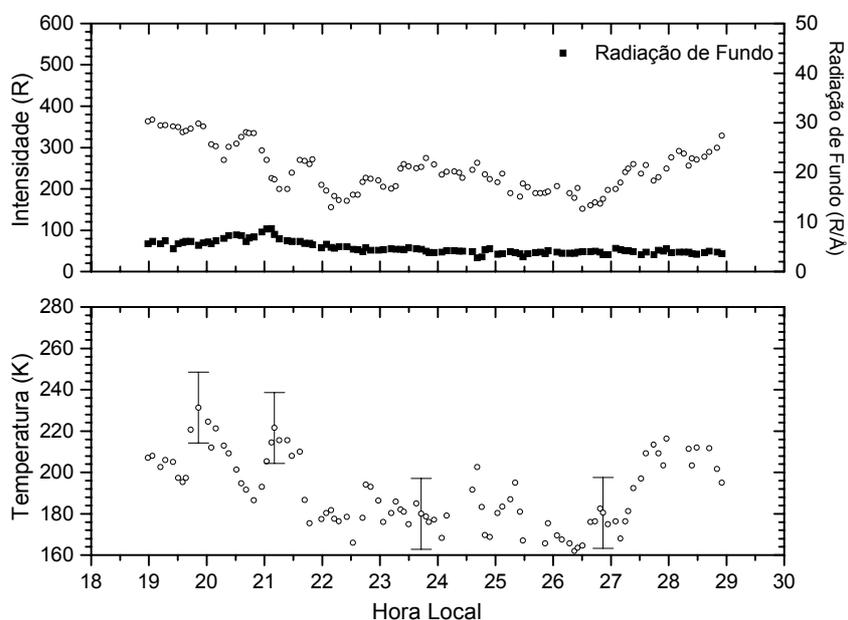


Fig. 4.6 - Intensidade e temperatura da molécula OH(8,3) observadas na noite de 11.08.99 com o fotômetro portátil do Laboratório LUME no Centro Espacial de Cachoeira Paulista – INPE.

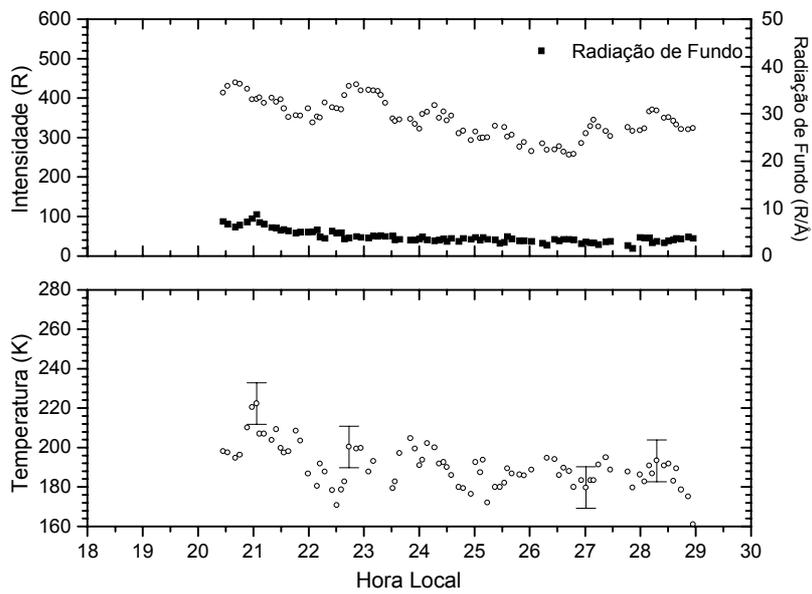


Fig. 4.7 - Intensidade e temperatura da molécula OH(8,3) observadas na noite de 12.08.99 com o fotômetro portátil do Laboratório LUME no Centro Espacial de Cachoeira Paulista – INPE.

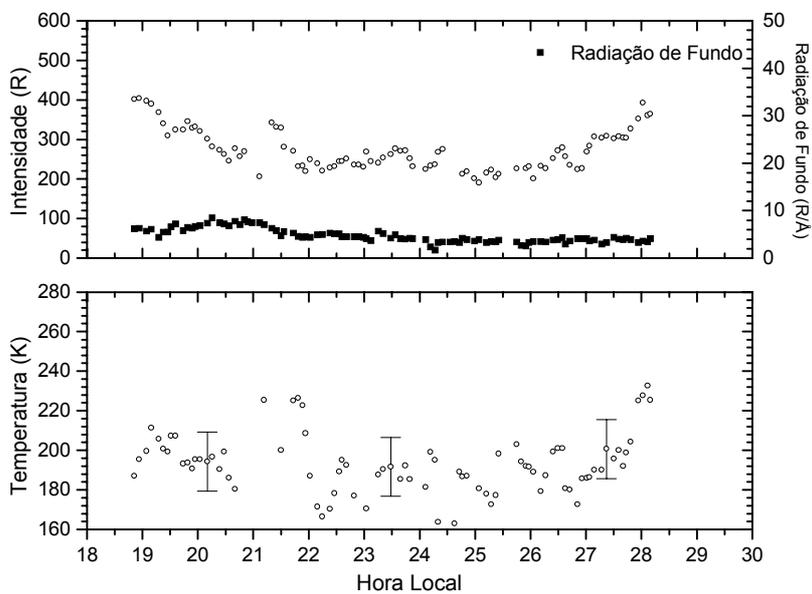


Fig. 4.8 - Intensidade e temperatura da molécula OH(8,3) observadas na noite de 13.08.99 com o fotômetro portátil do Laboratório LUME no Centro Espacial de Cachoeira Paulista – INPE.

A Figura 4.9 apresenta os resultados de 16.08.99, última noite de observação do mês de agosto. Observa-se na figura a presença de pequenas variações na intensidade de emissão após a meia noite e um máximo às 27,5 horas. A temperatura rotacional apresenta grande oscilação por volta das 24 e 25 horas, ocorrendo um mínimo e um máximo de 177 K e 228 K.

Na Figura 4.10 encontram-se os resultados observacionais da noite de 03.09.99, com aproximadamente, 10 horas de observações. A intensidade de emissão da OH apresenta um grande aumento na intensidade no início da noite. Nota-se um mínimo da intensidade por volta da meia noite e algumas variações em torno das 27 horas. A temperatura rotacional apresenta grandes variações durante a noite com um máximo de 246 K no início e 190 K no final do período.

Os resultados da noite de 04.09.99 com 10 horas de medidas são apresentadas na Figura 4.11, onde observa-se as mesmas características da noite anterior, mas com uma maior presença de ondas durante todo período. A intensidade de emissão apresenta um máximo na intensidade no início da noite e um mínimo em torno das 22 horas. A temperatura rotacional da OH apresentou uma amplitude de variação noturna em torno de 70 K, com um máximo da temperatura no início das observações e um mínimo no final do período.

A Figura 4.12 apresenta 9 horas de medidas realizadas durante a noite de 06.09.99. Percebe-se a falta de dados entre 21 e 21,5 horas e 23,5 e 24,5 horas, devido a cobertura de nuvens que impossibilitou as observações. A intensidade de emissão da OH apresentou pouca variação noturna, 112 R e a temperatura rotacional desta noite apresentou uma amplitude de variação de 70 K, durante todo período.

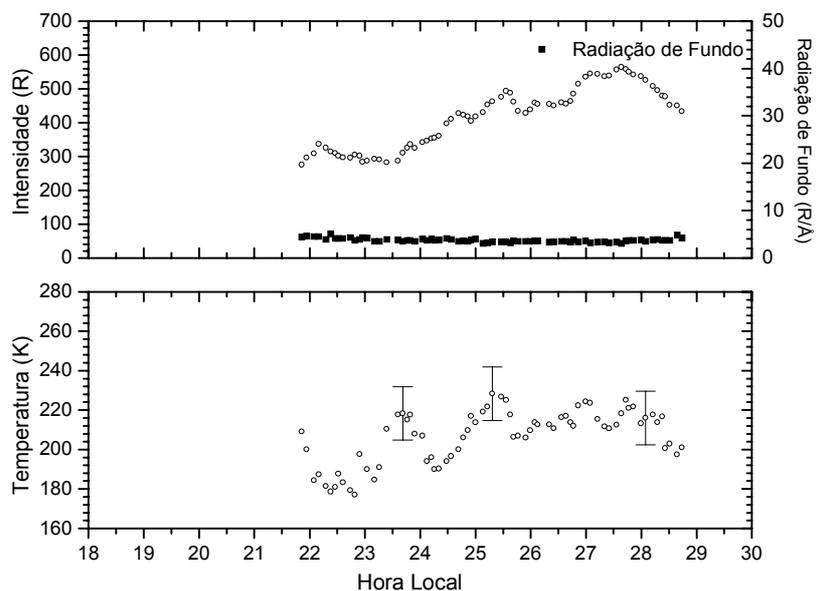


Fig. 4.9 - Intensidade e temperatura da molécula OH(8,3) observadas na noite de 16.08.99 com o fotômetro portátil do Laboratório LUME no Centro Espacial de Cachoeira Paulista – INPE.

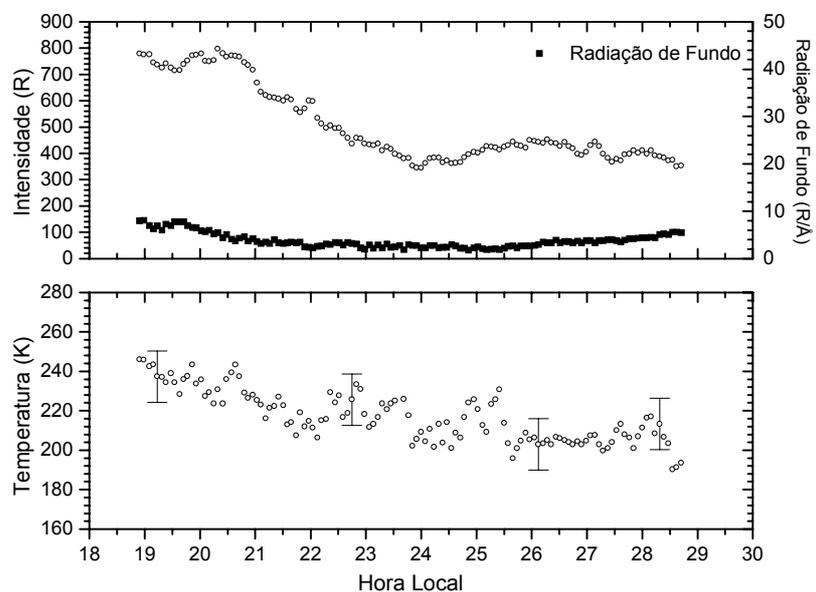


Fig. 4.10 - Intensidade e temperatura da molécula OH(8,3) observadas na noite de 03.09.99 com o fotômetro portátil do Laboratório LUME no Centro Espacial de Cachoeira Paulista – INPE.

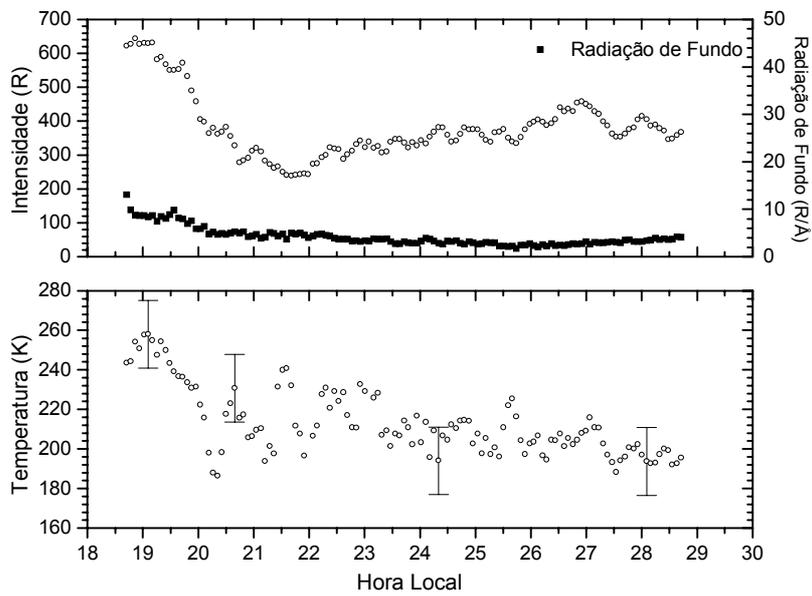


Fig. 4.11 - Intensidade e temperatura da molécula OH(8,3) observadas na noite de 04.09.99 com o fotômetro portátil do Laboratório LUME no Centro Espacial de Cachoeira Paulista – INPE.

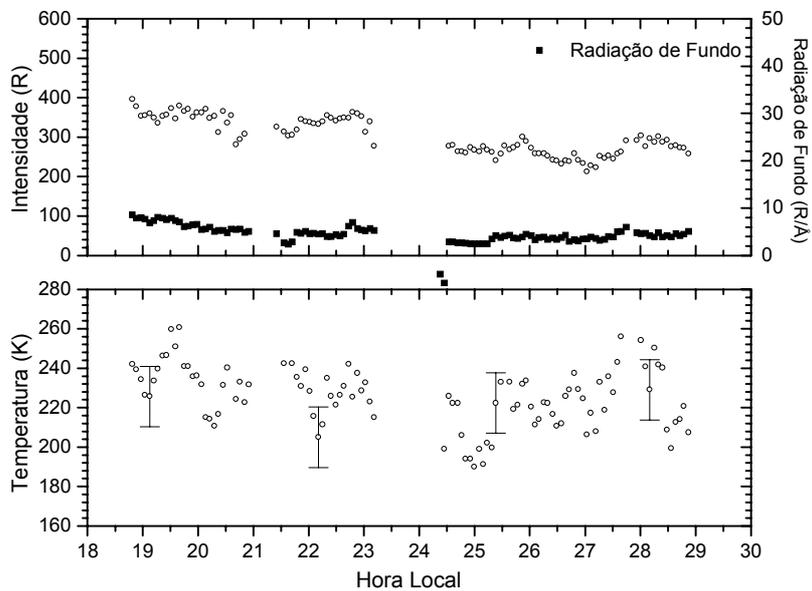


Fig. 4.12 - Intensidade e temperatura da molécula OH(8,3) observadas na noite de 06.09.99 com o fotômetro portátil do Laboratório LUME no Centro Espacial de Cachoeira Paulista – INPE.

A Figura 4.13 apresenta os dados observacionais obtidos na noite de 07.09.99. Observa-se na figura a presença de ondas na intensidade de emissão, antes da meia noite, e um aumento na intensidade no final do período. A temperatura rotacional da OH mostra um grande aumento na temperatura e nas variações durante a noite, onde a temperatura mínima e máxima ficaram em torno de 195 e de 270 K.

Na Figura 4.14 são apresentados os resultados observacionais da noite de 02.11.99, com 9 horas de medidas contínuas. Observa-se nesta noite uma grande intensidade na emissão da OH no início do período e a presença de ondas tanto na intensidade quanto na temperatura da OH. A temperatura varia de 186 a 252 K, com o mínimo em torno das 25 horas.

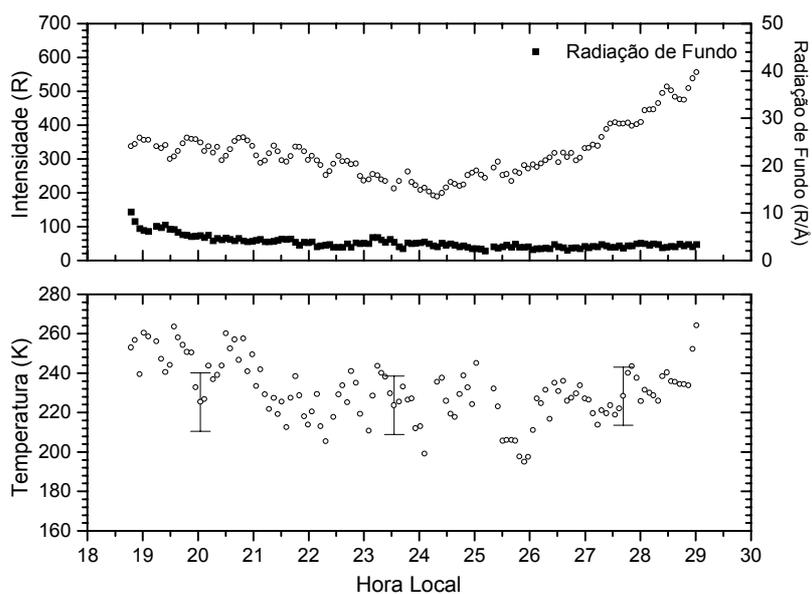


Fig. 4.13 - Intensidade e temperatura da molécula OH(8,3) observadas na noite de 07.09.99 com o fotômetro portátil do Laboratório LUME no Centro Espacial de Cachoeira Paulista – INPE.

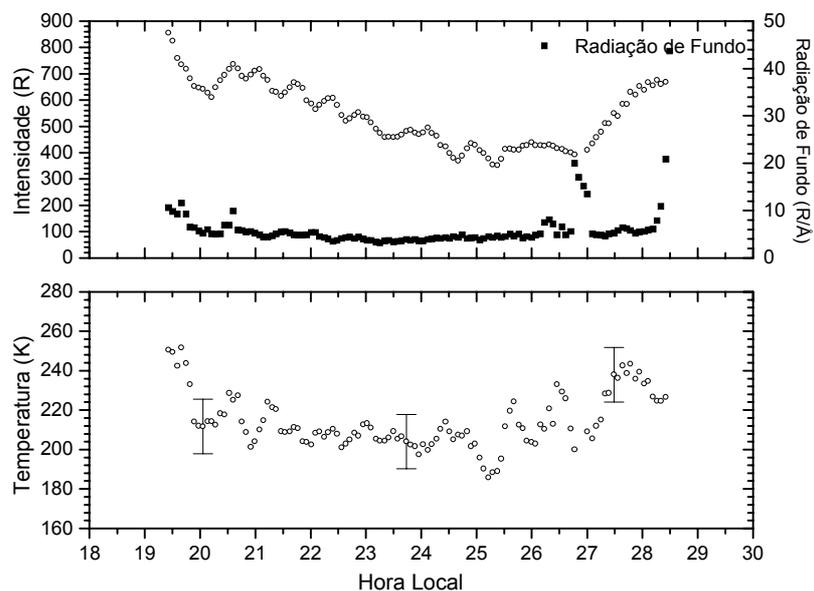


Fig. 4.14 - Intensidade e temperatura da molécula OH(8,3) observadas na noite de 02.11.99 com o fotômetro portátil do Laboratório LUME no Centro Espacial de Cachoeira Paulista – INPE.

As variações da intensidade de emissão e temperatura rotacional da OH(8,3) mostraram dois tipos de oscilações, as de longos períodos, de 6 a 8 horas, e as variações de curtos períodos, de 1 a 3 horas. As prováveis causas das variações de longos períodos são as oscilações da maré atmosférica (Taylor et al., 1999), enquanto que as oscilações de curtos períodos podem ser causadas pela passagem de ondas de gravidades atmosféricas (Gobbi, 1993; Costa,1997; Takahashi et al., 1999). O estudo destas estruturas ondulatórias não faz parte do objetivo deste trabalho de Dissertação, mas sua investigação será assunto para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da temperatura rotacional da OH(8,3) utilizando os distintos coeficientes de Einstein existentes na literatura.

5.1 DIFERENÇA DA TEMPERATURA ROTACIONAL DA OH(8,3) ENTRE OS COEFICIENTES DE EINSTEIN

Nos últimos 15 anos, os trabalhos publicados sobre a temperatura rotacional da OH (Sivjee a Hamwey, 1987; Schubert et al., 1990; Mulligan et al., 1995; Greet et al., 1998) mostraram diferenças existentes nas temperaturas devido ao uso de diversos coeficientes de Einstein. Neste capítulo serão verificadas estas diferenças usando os resultados obtidos e os coeficientes determinados por Mies (1974), Langhoff et al. (1986) e Turnbull e Lowe (1989).

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam dois exemplos da variação noturna da temperatura rotacional da OH(8,3) determinada utilizando os coeficientes de Einstein mencionados anteriormente.

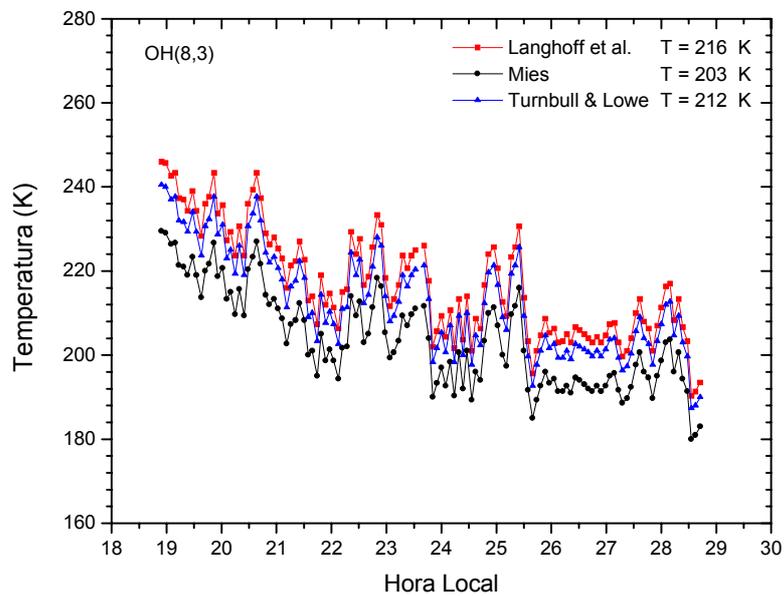


Fig. 5.1 - Temperatura rotacional da OH(8,3) observadas na noite de 03.09.99 com o fotômetro portátil do Laboratório LUME no Centro Espacial de Cachoeira Paulista – INPE.

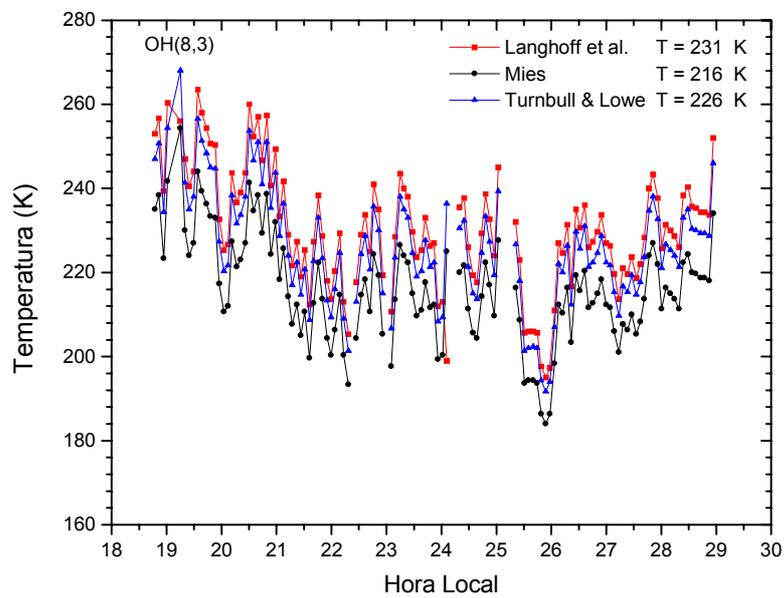


Fig. 5.2 - Temperatura rotacional da OH(8,3) observadas na noite de 07.09.99 com o fotômetro portátil do Laboratório LUME no Centro Espacial de Cachoeira Paulista – INPE.

As temperaturas apresentadas nas Figuras 5.1 e 5.2 mostram o mesmo comportamento na variação noturna para os três modelos de coeficientes. As temperaturas obtidas com os coeficientes de Langhoff et al. (1986) apresentam os maiores valores, 213 e 231 K para as noites de 03 e 07 de setembro. Os resultados obtidos usando os coeficientes de Mies (1974) apresentam os valores de temperatura mais baixos, 203 e 216 K para as duas noites, apresentando uma diferença de temperatura em torno de 10 a 15 K entre estes coeficientes.

A comparação da temperatura rotacional da OH(8,3) determinada utilizando os vários coeficientes de Einstein, é apresentada nos gráficos a seguir. As figuras apresentam todos os valores de temperatura rotacional determinados nas 19 noites em que ocorreram as observações da aeroluminescência terrestre.

Observa-se na Figura 5.3 a comparação das temperaturas rotacionais em função dos coeficientes de Turnbull e Lowe (1989) e Langhoff et al. (1986). A diferença da temperatura obtida utilizando estes coeficientes é de 2 K para as temperaturas na faixa de 180 K, chegando a 8 K para as temperaturas mais elevadas, na faixa de 270 K. Esta diferença pode ser visualizada comparando a reta pontilhada, temperatura rotacional observada, com a linha contínua do gráfico que foi traçada para comparar a diferença da temperatura entre os dois modelos de coeficientes.

A Figura 5.4 apresenta a comparação das temperaturas obtidas utilizando os coeficientes determinados por Mies (1974) e Langhoff et al. (1986). A diferença da temperatura é de 8 K para as temperatura menores, aumentando até 21 K para as temperatura mais altas. Esta diferença pode ser visualizada comparando a reta pontilhada, temperatura rotacional, com a linha contínua do gráfico que foi traçada para comparar a diferença da temperatura entre os dois modelos de coeficientes.

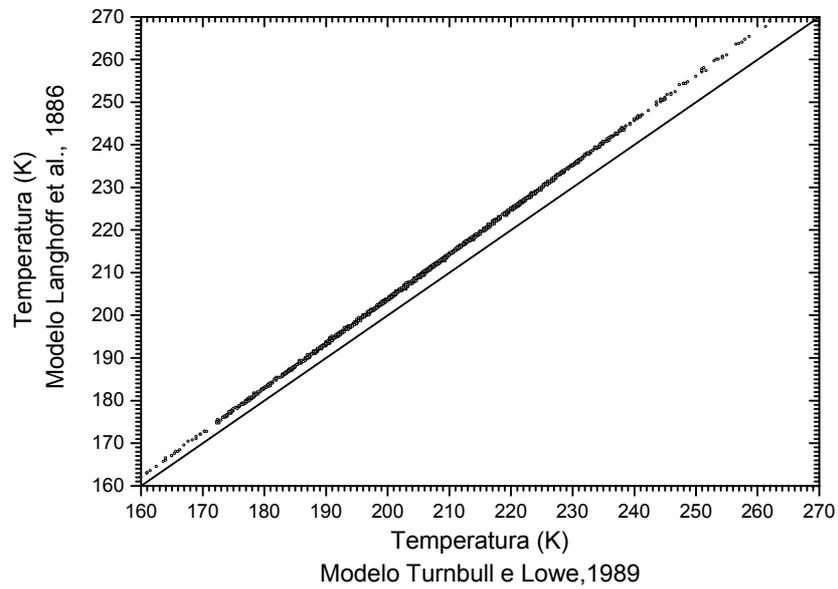


Fig. 5.3 - Comparação da temperatura rotacional da OH(8,3), obtida com os coeficientes de Einstein determinados por Turnbull e Lowe, (1989) e Langhoff et al. (1986). A linha contínua é a base desta comparação.

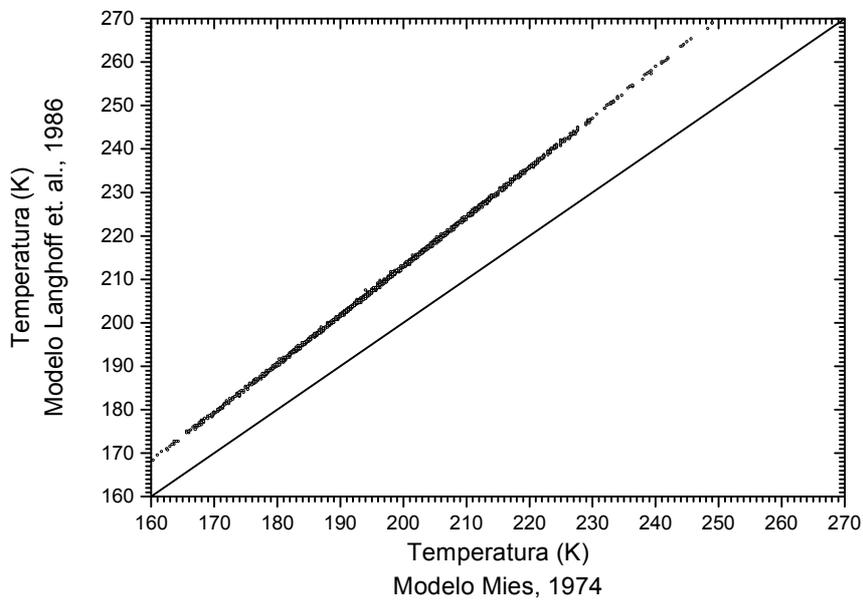


Fig. 5.4 - Comparação da temperatura rotacional da OH(8,3) obtida com os coeficientes de Einstein determinados por Mies, (1974) e Langhoff et al. (1986). A linha contínua é a base desta comparação.

As temperaturas rotacionais da OH(8,3) determinadas utilizando os coeficientes de Einstein obtidos por Mies (1974) e Turnbull e Lowe (1989), são exibidas na Figura 5.5. Observa-se que a diferença da temperatura é de 6 K para temperaturas inferiores, aumentando para 14 K nas temperatura mais elevadas. Pode-se visualizar esta diferença confrontando a reta pontilhada, temperatura rotacional, com a linha de base do gráfico.

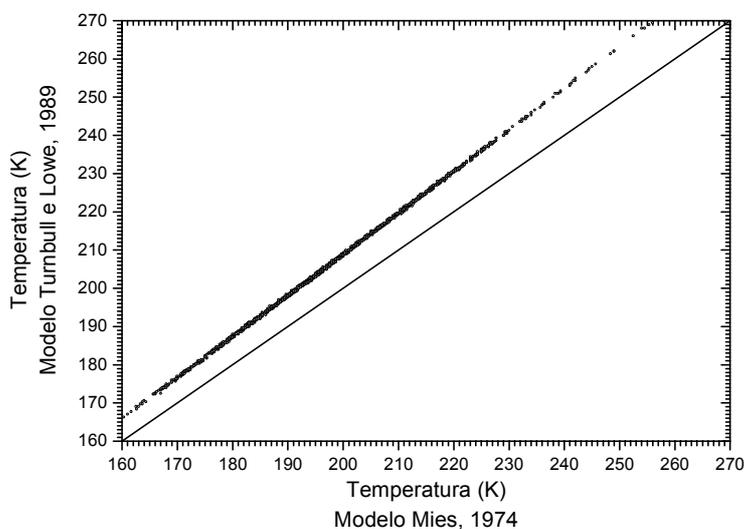


Fig. 5.5 - Comparação da temperatura rotacional da OH(8,3) obtida com os coeficientes de Einstein determinados por Mies (1974) e Turnbull e Lowe (1989). A linha contínua é a base desta comparação.

A Tabela 5.1 sintetiza as diferenças de temperatura obtidas usando os distintos coeficiente de Einstein da OH(8,3) apresentadas nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5. A primeira coluna apresenta o valor de temperatura em torno do qual ocorreram as comparações. As colunas dois, três e quatro apresentam a comparação da temperatura da OH(8,3) para os seguintes coeficientes de:

- Langhoff et al. *versus* Turnbull e Lowe;
- Langhoff et al. *versus* Mies;
- Turnbull e Lowe *versus* Mies.

TABELA 5.1 - DIFERENÇA DA TEMPERATURA ROTACIONAL DA OH(8,3) ENTRE OS DISTINTOS COEFICIENTES DE EINSTEIN

Temperatura	Diferença da Temperatura entre os Coeficientes		
	Langhoff et al. X	Langhoff et al. X	Turnbull & Lowe X
	Turnbull & Lowe	Mies	Mies
160 K	+ 2 K	+ 8 K	+ 6 K
270 K	+ 8 K	+ 21 K	+ 14 K

5.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS ROTACIONAIS DA OH(8,3) E OH(6,2)

A temperatura rotacional da OH(8,3) foi determinada utilizando os dados do fotômetro portátil e a temperatura rotacional da OH(6,2) foi obtida através dos dados observados pelo fotômetro MULTI2.

As temperaturas rotacionais da OH(6,2), medidas pelo fotômetro MULTI2, foram determinadas utilizando os coeficientes de Mies (1974) e Turnbull e Lowe (1989). Os coeficientes de Langhoff et al. (1986) não foram utilizados no programa de redução de dados do fotômetro MULTI2 e portanto, não foram utilizados nesta análise.

A Tabela 5.2 apresenta as médias noturnas das temperaturas da OH(8,3) e OH(6,2) entre os vários coeficientes de Einstein. A primeira coluna apresenta a data em que ocorreram as observações da aeroluminescência. As colunas dois, três e quatro apresentam as temperaturas da OH(8,3) utilizando os coeficientes de Mies (1974), Turnbull e Lowe (1989) e Langhoff et al. (1986) respectivamente. As colunas cinco e seis mostram as temperaturas da OH(6,2) determinadas utilizando os coeficientes de Mies (1974) e Turnbull e Lowe (1989).

Comparando as temperaturas rotacionais da OH(8,3) e da OH(6,2), Tabela 5.2, observa-se que os coeficientes que apresentam as temperatura mais semelhantes são os devidos a Mies (1974) para a OH(6,2) e os coeficientes de Langhoff et al. (1986) para a OH(8,3).

TABELA 5.2 – MÉDIAS NOTURNAS DAS TEMPERATURAS ROTACIONAIS DA OH(8,3) E OH(6,2) DETERMINADAS UTILIZANDO OS DIFERENTES COEFICIENTES DE EINSTEIN

Data	OH(8,3) - $\Delta v=5$			OH(6,2) - $\Delta v=4$	
	Mies	Turnbull & Lowe	Langhoff et al.	Mies	Turnbull & Lowe
06-08-99	192.9	201.3	205	208.4	216.2
07-08-99	203.8	213.1	217.3	214.5	223
09-08-99	197.6	206.2	209.2	203.2	210.7
10-08-99	186.5	194.3	197.7	200.3	207.5
11-08-99	179.9	188.7	190.4	209.4	217.4
12-08-99	180	187.3	190.4	207.5	215.3
13-08-99	183.1	192.4	193.4	208	215.5
16-08-99	194.5	202.9	206.7	218.7	226.8
03-09-99	203.6	212.7	216.9	217.6	226.4
04-09-99	201	209.9	213.1	213.9	222.3
05-09-99	208.3	217.7	222.3	217.1	225.1
06-09-99	211.3	221.1	225.8	220	228.2
07-09-99	217.1	227.4	231.4	231.9	238.5
13-09-99	199.9	208.9	211.1	208.9	217.2
06-10-99	184.7	192.4	195.6	216.2	224.2
07-10-99	186.5	194.3	197.8	214.3	222.6
08-10-99	192.8	201.1	204.8	204.7	212.3
02-11-99	201.1	210	214.1	224.2	230.8
03-11-99	215.5	225.6	229.8	228.2	235.8

É importante salientar que entre os coeficientes de Einstein existentes na literatura aqueles que apresentam as maiores diferenças entre os seus valores são os devido às transições $\Delta v=4$ e $\Delta v=5$, como é o caso da OH(6,2) e da OH(8,3), porém, o mesmo não ocorre para as transições inferiores, $\Delta v=1$ e $\Delta v=2$ (Golden,1997), ver seção 2.2.2.1 - Os coeficientes de Einstein.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

O desenvolvimento do fotômetro portátil pelo laboratório LUME do INPE tornou possível a conclusão desta Dissertação de Mestrado. A montagem do equipamento foi realizada em conjunto com os técnicos e engenheiros do laboratório LUME do INPE. Com isto foi possível acompanhar a construção do fotômetro portátil em todas as suas etapas, tais como, na montagem do rack, das placas do circuito eletrônico, do tubo fotomultiplicador, do sistema ótico, do ajuste e posicionamento da lente, do filtro de interferência e do diafragma empregado.

A seguir serão novamente destacados os objetivos específicos desta Dissertação e as suas realizações:

- 1) Desenvolvimento do programa para aquisição e redução dos dados e a realização do processo de calibração do fotômetro portátil.

Desenvolveu-se um programa de aquisição de dados para o fotômetro portátil, constituindo a fase final da construção do equipamento, envolvendo o aprendizado da comunicação serial entre o computador e o fotômetro. A seguir realizou-se o processo de calibração espectral e de sensibilidade absoluta do fotômetro para avaliar as qualidades óticas dos filtros de interferências a serem utilizados e a sensibilidade do fotômetro na região do espectro do infravermelho próximo, onde ocorrem as emissões da OH(8,3).

As calibrações permitiram também a determinação de parâmetros importantes para o processo de redução dos dados, tais como: as posições do filtro para as

medidas das linhas rotacionais, a sensibilidade do instrumento em cada uma destas posições e as larguras efetivas do filtro onde estas linhas são medidas.

Desenvolveu-se um programa de redução dos dados para o fotômetro portátil reunindo os conhecimentos adquiridos no estudo do espectro da molécula OH e os parâmetros determinados no processo de calibração. Isto possibilitou determinar os valores da intensidade de emissão e da temperatura rotacional da OH(8,3), bem como, o ruído de fundo do céu durante as noites de observações.

2) Observação do céu noturno para a determinação do espectro de emissão da OH(8,3) da atmosfera terrestre.

Após a instalação do fotômetro portátil no Laboratório Lume do Centro Espacial de Cachoeira Paulista – INPE foram realizadas as observações da aeroluminescência terrestre da OH(8,3). Estas observações ocorreram durante os meses de agosto a novembro de 1999. A intensidade de emissão e a temperatura rotacional média observada foram de 358 R e 210 K, respectivamente. Nestes cálculos foram usados os coeficientes de Einstein determinados por Langhoff et al. (1986).

3) Análise e comparação da temperatura rotacional da OH(8,3) obtida utilizando três modelos distintos dos coeficientes de Einstein e a comparação da temperatura rotacional da OH(8,3) com a OH(6,2).

As temperaturas rotacionais da OH(8,3) que apresentaram as menores diferenças foram aquelas determinadas utilizando os coeficientes de Einstein de Turnbull e Lowe (1989) e Langhoff et al. (1986), com 2 K de diferença para temperaturas próximas à 160 K.

As variações noturnas da intensidade de emissão e da temperatura rotacional da OH(8,3) apresentaram um comportamento ondulatório, refletindo as variações de marés e ondas de gravidades que se propagam na atmosfera.

A comparação da temperatura rotacional determinada utilizando distintos coeficientes de Einstein mostrou que as temperaturas da OH(6,2) e da OH(8,3) que apresentam os resultados mais próximos são devidos ao uso dos coeficientes de Mies (1974) para a OH(6,2) e dos coeficientes de Langhoff et al. (1986) para a OH(8,3).

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se a comparação das temperaturas rotacionais entre a OH(8,3), OH(6,2) e OH(3,1), pois esta última está sendo medida desde o final do ano de 1999 no laboratório LUME do Centro Espacial de Cachoeira Paulista – INPE. O comportamento da temperatura rotacional da OH(3,1) obtida utilizando distintos coeficientes de Einstein melhoraria o nosso conhecimento a respeito da temperatura entre as bandas da OH e da temperatura da mesopausa terrestre.

Para o fotômetro portátil propõe-se desenvolver um método para diminuir o ruído térmico, como por exemplo, refrigerar ou ventilar o tubo fotomultiplicador. Isto possibilitaria medir o espectro da aeroluminescência com maior resolução espectral e obter os valores da intensidade de emissão e temperatura rotacional da OH(8,3) em intervalos de tempo inferiores a quatro minutos, que é o tempo de medida atual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almanaque de Ciência. Tóquio, Observatório Astronômico da Universidade de Tokyo, Maruzen, v.1, 1970.
- Balan, N.; Bailey, G. J.; Abdu, M. A.; Oyama, K. I.; Richards, P. G.; MacDougall, J.; Batista, I. S. Equatorial plasma fountain and its effects over three locations: evidence for an additional layer, the F3 layer. **J. Geophys. Res.**, v.102, n. A2, p.2047-2056, 1997.
- Banks, P. M.; Kockarts, G. **Aeronomy – Part A.**: New York: Academic, 1973. 430 p.
- Benedict, W. S.; Plyler, E. K.; Humphreys, C. J. The emission spectrum of OH from 1,4 to 1,7 μ . **J. Chem. Phys.**, v.21, n.3, p.398-402, 1953.
- Bates, D. R.; Nicolet, M. The photochemistry of the atmospheric water vapor. **J. Geophys. Res.**, v.55, n.3, p.301-327, 1950.
- Baulch, D. L.; Cox, R. A.; Crutzen, P. J.; Hampson, Jr. R. F.; Kerr, J. A.; Troe, J.; Watson, R. T. Exothermicity of O₃+H reaction. **J. Phys. Chem.** v.11, p. 362-370, 1982.
- Braessur, G.; Solomon, S. **Aeronomy of the middle atmosphere.** Dordrecht, Holanda: D. Reidel 1986, 441 p.
- Chamberlain, J. W. **Physics of the aurora and airglow.** New York: Academic, 1961, 704 p.
- Chamberlain, J. W.; Hunter, D. M. **Theory of the planetary atmospheres.** New York, 2.ed. Academic, 1987, v. 36, p. 329.
- Chamberlain, J. W.; Oliver, N. J. OH in the airglow at high latitudes. **Phys. Rev.** n. 90, p.1118-1119, 1953.

- Chamberlain, J. W.; Roesler, F. L. The OH bands in the infrared airglow. **Astrophys. J.**, v.121, n.5, p.541-547, 1955.
- Clemesha, B. R.; Veselovskii, I.; Batista, P. P.; Jorge, M. P. P. M.; Simonich, D. M. First mesopause temperature profiles from a fixed southern hemisphere site. **Geophys. Res. Lett.**, v.26, n.12, p.1861-1864, 1999.
- Costa, R. A. B. da. **Estudo de parâmetros de ondas de gravidade por medidas simultâneas de radar MU e fotômetro em Shigaraki (35° N, 136° L) Japão.** São José dos Campos p. 176. (INPE 6647-DTI/624). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997.
- Coxon, J. A.; Foster, S. C. Rotational analysis of hydroxyl vibration-rotation emission bands: molecular constants for OH X ²Π, 6 ≤ v ≤ 10. **Can. J. Phys.** v.60, n.41, p.41-48, 1982.
- Eather, R. H.; Reasoner, D. L. Spectrophotometry of faint light sources with tilting-filter photometer. **Appl. Optics**, v.8, n.2, p.227-242, 1969.
- Egeland, A.; Holter, O.; Omholt, A. **Cosmical Geophysics.** Universitetsforlaget, Oslo/Bergen/Tromsø, Munksgaard, Copenhagen, 1973, cap. 6, p. 81-92.
- Espy, P. J. **Spectroscopic investigation of the infrared molecular band systems of N₂ and N₂⁺ resulting from low energy electron impact excitation.** PhD thesis, Utah State Univ., Logan, 1986.
- Fagundes, P. R.; Gobbi, D.; Takahashi, H.; Sahai, Y. Mesospheric energy loss rates by OH and O₂ emission at 23° S. **Ann. Geophys.**, n.15, p.797-804, 1997.
- Faire, A. C.; Champion, K. S. W. Recent density, temperature and pressure results obtained at white sands missile range compared with IQSY results. **Space Res.**, v.8, p.845-856, 1967.
- Finlayson-Pitss, B. J.; Kleindienst, T. E. The reaction of hydrogen atoms with ozone as a source of vibrationally excited OH(X ²Π)_{v=2} for kinetic studies. **J. Chem. Phys.**, v.74, n.10, p. 5643-5658, 1981.
- Gobbi, D. **Estudo de ondas de gravidade na alta atmosfera através de observações de luminescência atmosférica da hidroxila OH(9-4) e Oxigênio O₂(0-1).** São José dos Campos, p. 208. (INPE 5539-DTI/527).

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1993.

Gobbi, D. **Radiância** [Programa para calcular a sensibilidade absoluta dos fotômetros, utilizando a radiância de uma fonte de luz padrão], 1995a.

Gobbi, D. **Transmitância** [Programa para calcular a curva de transmissão de um filtro de interferência, utilizando os arquivos gerados pelo monocromador Jobin-Yvon], 1995b.

Golden, S. A. Kinetic parameters for OH nightglow consistent with recent laboratory measurements. **J. Geophys. Res.**, v.102 n.A9, p.19969-19976, 1997.

Goldman, A.; Schoenfeld, W. G.; Goorvitch, D.; Chackerian Jr, C.; Dothe, H.; Mélen F.; Abrams, M. C.; Selby, J. E. A. Updated line parameters for OH $X^2\Pi - X^2\Pi (v'',v')$ transitions. **J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.**, v.59, n.3-5, p.453-469, 1998.

Golitsyn, G. S.; Samenov, A. I.; Shefov, N. N.; Fishkova, L. M.; Lysenko, E. V.; Perov, S. P. Long-term temperature trends in the middle and upper atmosphere. **Geophys. Res. Lett.**, v.23 n.14, p.1741-1744, 1996.

Greenblatt, G. D.; Wiesenfeld, J. R. Time-resolved emission studies of vibrationally excited hydroxyl radicals: OH($X^2\Pi, v'=9$). **J. Geophys. Res.** v. 87 n.C13, p. 11145-11152, 1982.

Greet, P. A.; French, W. J. R.; Burns, G. B.; Williams, P. F. B.; Lowe, R. P.; Finlayson, K. OH(6,2) spectra and rotational temperature measurements at Davis, Antarctica. **Ann. Geophysices**, v.16, n.1, p.77-89, 1998.

Heaps, H. S.; Herzberg, H. Intensity distribution in the rotational-vibrational spectrum of the OH molecule. **Zeitschrift für Physik.** v.133, n.1, p.48-64, 1952.

Herzberg, H. **Molecular spectra and molecular structure.** London 2.ed.: D. Van Nostrand, 1950. 658 p.

Hill, E. L.; Van Vleck, J. H. On the quantum mechanics of the rotational distortion of multiples in molecular spectra. **Physical Review**, v.32, p.250-272, 1928.

Holtzclaw, K. W.; Person, J. C.; Green, D. B. Einstein coefficients for emission from high rotational states of the OH($X^2\Pi$) radical. **J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.**, n.49, p.223-233, 1993.

Hönl, H.; London, F. Intensities of band spectrum lines. **Z. Phys.**, v.33, n.3, p.803-810, 1925.

Johnston, J. E.; Broadfoot, A. L. Midlatitude observations of the airglow: Implication to quenching near the mesopause. **J. Geophys. Res.**, v.98 n.D12, p.21593-21603, 1993.

Kirchhoff, V. W. J. H. **Elementos básicos sobre fotômetros de filtro inclinável.** São José dos Campos: INPE, (INPE 3124-MD/026), 1984.

Kirchhoff, V. W. J. H. **Introdução à geofísica espacial.** São Paulo: Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo: FAPESP, 1991. 141 p.

Klein, V. M.; Furtak, T. E. **Optics.** 2.ed. New York, John Wiley & Sons , 1986, 660 p.

Krassovsky, V. I. Infrasonic variations of OH emission in the upper atmosphere. **Ann. Geophys.**, v.8, n.4, p.739-746, 1972.

Klenerman, D.; Smith, I. W. M. Infrared chemiluminescence studies using a SISAM spectrometer-reactions producing vibrationally excited OH. **J. Chem. Soc. Farad. Trans.**, v.83 p.229-235, 1987.

Krassovsky, V. I. The hydroxyl emission problem and paths of its solution. **J. Ann Geophys.** v.27, p. 211-221, 1971.

Krassovsky, V. I.; Shefov, N. N.; Yarin, V. I. On the OH airglow. **J. Atmos. Terr. Phys.**, v.21, p.46-53, 1961.

Krassovsky, V. I.; Shefov, N. N.; Yarin, V. I. Atlas of the airglow spectrum 3000-12400Å. **Planet. Space Sci.**, v.9, p.883-915, 1962.

Krassovsky, V. I.; Shegaev, M. V. Optical method of recording acoustic or gravity waves in the upper atmosphere. **J. Atmos. Terr. Phys.**, v.36, p.373-375, 1974.

- Kulkarni, P. V.; Sanders, C. L. Use of radioactivated light source for the absolute calibration of two-color night airglow photometer. **Planet. Spac Sci.**, v.12, p.189-194, 1964.
- Kvifte, G. Hydroxyl rotational temperatures and intensities in the nightglow. **Planet. Spac Sci.**, v.15, p.1515-1523, 1967.
- Kvifte, G. Nightglow observations at Ås during the I.G.Y. **Geophys. Publ.** v.20, n.12, p.1-19, 1959.
- Langhoff, S. R.; Werner H. J.; Rosmus, P. Theoretical transition probabilities for the OH Meinel system. **J. Mol. Spectros.**, v.188, p.507-529, 1986.
- McDade, I. C.; Llewellyn, E. J. Kinetic parameters related to a source and sink of vibrationally excited OH in the nightglow. **J. Geophys. Res.** v.92 n.9, p.7643-7650, 1987.
- McDade, I. C.; Llewellyn, E. J.; Murtagh, D. P.; Greer, R. G. ETON 5 Simultaneous rocket measurements of the OH Meinel $\Delta v=2$ sequence and OH(8,3) band emission profile in the nightglow. **Planet. Space Sci.** v.35 n.9, p.1137-1147, 1987.
- McDade, I. C.; Llewellyn, E. J. Mesospheric oxygen atom densities inferred from night-time OH Meinel band emission rate. **Planet. Space Sci.** v.36, n.9, p.897-905, 1988.
- Meinel, A. B. OH emissions band in the spectrum of the night sky I. **Astrophys. J.**, v.3, n.111, p.555-564, 1950a.
- Meinel, A. B. OH emissions band in the spectrum of the night sky II. **Astrophys. J.**, v.1, n.112, p.120-130, 1950b.
- Melo, S. M. L. **Aeroluminescência da região equatorial: Estudo via experimento de foguete.** São José dos Campos, p. 191. (INPE 5589-DTI/551). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1994.
- Melo, S. M. L.; Takahashi, H.; Clemencha, B. R.; Simonich, D. M. An experimental study of the nightglow OH(8,3) band emission process in the equatorial mesosphere. **J. Atmos. Terr. Phys.**, v.59, n.5, p. 479-486, 1997.

- Melo, S. M. L.; Gobbi, D.; Takahashi, H.; Teixeira, N. R.; Lobo, R. **O fotômetro MULTI2 Experiência de calibração – 1992**. São José dos Campos:INPE, (INPE-5526, NCT/310), 1993.
- Meriwether, J. W. High-latitude airglow observations of correlated short-term fluctuations in the hydroxyl Meinel 8-3 band intensity rotational temperature. **Planet. Space. Sci.**, v.23, p.1211-1221, 1974.
- Meriwether, J. W. A Review of the photochemistry of selected Nightglow emissions from the mesopause. **J. Geophys. Res.**, v.94, n.D12, p.14629-14646, 1989.
- Mies, F. H. Calculated vibrational transitions probabilities of OH($X^2\Pi$). **J. Mol. Spectros.**, v.53, p.150-188, 1974.
- Mulligan, F. J.; Horgan, D. F.; Galligan, J. G.; Griffin, E. M. Mesopause temperatures and integrated band brightness calculated from airglow OH emission recorded at Maynooth (53,2° N, 6.4° W) during 1993. **J. Atmos. Terr. Phys.**, v.57, n.13, p.1623-1637, 1995.
- Murphy, R. E. Infrared emission of OH in the fundamental and first overtone bands. **J. Chem. Phys.**, v.54, n.11, p. 4852-4859, 1971.
- Murtagh, D. P.; Stegman, J.; Witt, G.; Llewellyn, E. J.; Medade, I. C. A Twilight measurement of the OH(8-3) Meinel band and atmospheric temperature. **Planet Space. Sci.** v. 35, n. 9, p. 1149-1155, 1987.
- Myrabø, H. K.; Deehr, C. S. Polar Cap OH airglow rotational temperatures at the mesopause during a stratospheric warming event. **Planet. Space Sci.**, v.32, n.7, p. 853-856, 1984.
- Nelson, Jr. D. D.; Schiffman A.; Nesbit, D. J.; Orlando, J. J.; Burkholder, J. B. H + O₃ Fourier-transform infrared emission and laser absorption studies of OH ($X^2\Pi$) radical: An experimental dipole moment function and state-to-state Einstein A coefficients. **J. Chem. Phys.**, v.93, n.10, p.7003-7019, 1990.
- Peterson, K. I.; Fraser, G. T.; Klemperer, W. Electric dipole moment of $X^2\Pi$ OH and OD in several vibrational states. **Can. J. Phys.** v.62, p.1502-1518, 1984.
- Rind, D.; Suozzo, R.; Balachandran, N. K.; Prather, M. J. Climate changes and the middle atmosphere. Part 1: the doublet CO₂ climate. **J. Atmosph. Sci.**, v.47, p. 475-494, 1990.

- Rishbeth, H.; Garriott, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York: Academic, 1969. 331 p.
- Roble, R. G.; Dickison, R. F. How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere ? **Geophys. Res. Lett.**, v.16, p.1441-1444, 1989.
- Rodrigo, R.; López-Moreno, J. J.; López-González, M. J. Garcia-Alvarez, E. Atomic oxygen concentrations from OH and O₂ nightglow measurements. **Planet. Space. Sci.**, v.37, p.49-60, 1989.
- Schubert, G.; Walterscheid, R. L.; Heacht, J. H.; Sivjee, G. G. Temperature gradients at mesopause heights inferred from OH nightglow data. **J. Geophys. Res.**, v.95, n.A11, p.19061-19067, 1990.
- Sharp, W. E.; Kita, D. In situ measurement of atomic hydrogen in the upper mesosphere. **J. Geophys. Res.** v.92, n.D4, p.4319-4324, 1987.
- Shefov, N. N. Hydroxyl emission of the upper atmosphere – I the behavior during a solar cycle, seasons and geomagnetic disturbances. **Plant. Space Sci.** v.17, p.979-813, 1969.
- Shiokawa, K.; Katoh, Y.; Satoh, M.; Ejiri, M. K.; Ogawa, T.; Nakamura, T.; Tsuda, T.; Wiens, H. R. Developed of optical mesosphere thermosphere imagens (OMTI). **Earth Planets Space**, v.51, n.7 e 8, p.887-896. 1999.
- Sivjee, G. G. Airglow hydroxyl emissions. **Planet. Space Sci.**, v. 40, n.2e3, p.235-242, 1992.
- Sivjee, G. G.; Hamwey, R. M. Temperature and chemistry of the polar mesopause OH. **J. Geophys. Res.**, v.92, n.A5, p.4663-4672, 1987.
- Sivjee, G. G.; Walterscheid, R. L.; Hecht J. H.; Hamwey, R. M.; Schubert, G.; Christensen, A. B. Effects of atmospheric disturbances on polar mesopause airglow OH emissions. **J. Geophys. Res.**, v.92, n.A7, p.7651-7656, 1987.
- Stevens, W. J.; Das, G.; Wahl A. C.; Krauss, M.; Neumann, D. Study of the ground state potential curve and dipole moment of OH by the method of optimized valence configurations. **J. Chem. Phys.**, v.61, n.4, p.3686-3694, 1974.
- Streit, G. E.; Johnston, H. S. Reaction and quenching of vibrationally excited hydroxyl radicals. **J. Chem. Phys.**, v.64, n.1, p.95-103, 1976.

- Stubbs, L. C., Boyd, J. S. Bond, F. R. Measurement of the OH rotational temperature at Mawson, East Antarctica. **Planet. Space Sci.**, v. 31 n. 8, p. 923-932, 1983.
- Takahashi, H. **A study of OH(8,3) band emission in night airglow.** São José dos Campos:INPE, (INPE 314-RI/97), 1973.
- Takahashi, H. **Observações das bandas (9,4), (8,3), (7,2), (6,2) e (5,1) da emissão OH na luminescência atmosférica e o mecanismo de produção da OH excitada na alta atmosfera.** São José dos Campos, p.127. (INPE 2046-DTL/50). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1981.
- Takahashi, H.; Batista, P. P. Simultaneous measurements of OH(9,4), (8,3), (7,2), (6,2) and (5,1) band in the airglow. **J. Geophys. Res.**, v.86, n.A7, p.5632-5642, 1981.
- Takahashi, H.; Sahai, Y.; Clemecha B. R.; Simonich, D. M.; Teixeira, N. R.; Eras, A.; Lobo, M. R. Equatorial mesospheric and F region airglow emission observed from latitude 4° south. **Planet Space Sci.**, v.37, p.649-655, 1989.
- Takahashi, H.; Sahai, Y.; Clemesha, B. R.; Batista, P. P.; Teixeira, N. Diurnal and seasonal variations of the OH(8,3) airglow bands and its correlation with OI 5577 Å. **Planet. Space Sci.**, v.25, p.541-547, 1977.
- Takahashi, H.; Clemesha, B. R.; Sahai, Y. Nightglow OH(8,3) band intensities and rotational temperature at 23° S. **Planet. Space Sci.**, v.22, p.1323-1329, 1974.
- Takahashi, H.; Batista, P. P.; Buriti, R. A.; Gobbi, D.; Nakamura T.; Tsuda, T.; Fukao, S. Response of the airglow OH emission, temperature and mesopause wind to the atmospheric wave propagation over Singaraki, Japan. **Earth Planets and Space**, v.51, n.7 e 8, p.863-875, 1999.
- Takahashi, H.; Melo, S. M. L.; Clemecha B. R.; Simonich, D. M.; Stegman, J.; Witt, G. Atomic hydrogen and ozone concentration derived from simultaneous lidar and rocket airglow measurements in the equatorial region. **J. Geophys. Res.**, v.101, n.D2, p.4033-4040, 1996.
- Takeuchi, I.; Misawa, K. Successive approximation for determining the hydroxyl rotational temperature. **App. Optics**, v.18, n.22, p.3805-3809, 1979.

- Taylor, M. J.; Pendleton, W. R.; Takahashi, H.; Gobbi, D.; Goldberg, R. A. Image measurements of short-period gravity waves at equatorial latitudes. **J. Geophys. Res.**, n.102, p.26283-26299, 1997.
- Taylor, M. J.; Bishop, M. B.; Taylor, V. All-sky measurements of short period waves imaged in the OI(557,7 nm), Na (589,2 nm) and near infrared OH and O₂ (0,1) nightglow emissions during the ALOHA-93 campaign. **Geophys. Res. Lett.**, v.22, p.2849-2852, 1995.
- Taylor, M. J.; Hill, M. J. Near infrared imaging of hydroxyl wave structure over an ocean site at low latitudes. **Geophys. Res. Lett.**, v.18, p.1333-1336, 1991.
- Taylor, M. J.; Pendleton, W. R. Jr.; Gardner, C. S.; States, R. J. Comparison of diurnal tidal oscillations in mesospheric OH rotational temperature and Na lidar temperature measurements at mid-latitudes for fall/spring conditions. **Earth Planets and Space**, v.51, n.7 e 8, p.877-885, 1999.
- Turnbull, D. N.; Lowe, R. P. New hydroxyl transitions probabilities and their importance in airglow studies. **Planet. Space Sci**, v.37, n.6, p.723-738, 1989.
- Viereck, R. A.; Deehr, C. S. On the interaction between gravity waves and the OH Meinel (6,2) and the O₂ atmospheric (0,1) band in the polar night airglow. **J. Geophys. Res.**, v.94, n.A5, p. 5397-5404, 1989.
- Visconti, G.; Congeduti, F.; Fiocco, G. **The radiating atmosphere**. New York, McCormac, Ridel, Holand, 82 p., 1971.
- Wallace, J. M.; Hobbs, P. V. **Atmospheric Science – An introductory survey**. New York :Academic, 1977. 470 p.
- Wallace, L. Note on the airglow temperature determinations from OH spectra. **J. Geophys. Res.** v.65, p.921-923, 1960.
- Wallace, L. Season variation and interpretation of the OH rotational temperature of the airglow. **J. Atmos. Terr. Phys.** v.20, p. 85-93, 1961.
- Walterscheid, R. L.; Schubert, G.; Straus, J. M. A dynamical-chemical model of the wave-driven fluctuations in the OH nightglow. **J. Geophys. Res.**, v.92, n.A2, p.1241-1254, 1987.

Wiens, R. H.; Zhang, S. P.; Peterson, R. N.; Shepherd, G. G. MORTI: A mesopause oxygen rotational temperature imager. **Planet. Space Sci.**, v.39, n.6, p.1363-1375, 1991.

Wiens, R. H.; Zhang, S. P.; Peterson, R. N.; Shepherd, G. G. Tides in emission rate temperature from O₂ nightglow over Bear lake Observatory. **Geophys. Res. Lett.**, v.22, p.2637-2640, 1995.

Williams, P. F. B. OH rotational temperatures at Davis, Antarctica, via scanning spectrometer. **Planet. Space Sci.**, v. 44, n.2, p.163-170, 1996.

Wrasse, C. M.; Takahashi, H.; Rettori, G. Construção de um espectrofotômetro para monitoramento da temperatura da mesopausa na região Polar Antártica. International Congress of the Brazilian Geophysical Society. **G., Anais.** Rio de Janeiro, 1999.

Yano, K.; Kiyama Y. Nightglow photometer calibration (I). A low brightness standard. NAGO. 2, 1975.

APÊNDICE A

DETERMINAÇÃO DO ESPECTRO DA OH(8,3)

Neste apêndice encontram-se as tabelas referentes aos cálculos descritos na Seção 2.2. A Tabela A.1 apresenta os resultados dos cálculos efetuados para esta Dissertação dos termos rotacionais $F_1(v)$ e $F_2(v)$, Equações (2.9) e (2.10). As Tabelas A.2, A.3 e A.4 contêm, respectivamente, os resultados dos cálculos do número de onda, Equações (2.12), (2.13) e (2.14), comprimento de onda no vácuo, Equação (2.15), e comprimento de onda no ar, Equação (2.16)

Na Tabela A.5 são apresentados os resultados dos cálculos da intensidade das linhas rotacionais da OH(8,3), Equação (2.19). E, as Tabelas A.6, A.7 e A.8 apresentam os coeficientes de Einstein calculados por Langhoff et al. (1986), Mies (1974) e Turbull e Lowe (1989), referentes a molécula OH(8,3).

TABELA A.1 – ENERGIA ROTACIONAL F_1 e F_2 (cm^{-1}) - MOLÉCULA OH

J	$F_1(v=3)$	$F_1(v=8)$	$F_2(v=3)$	$F_2(v=8)$
0,5	0,0000	0,0000	86,3568	83,1073
1,5	-41,6259	-47,3332	140,1916	124,7553
2,5	33,3675	12,4734	229,3456	193,8569
3,5	139,0412	96,4732	353,1751	290,0265
4,5	275,7470	204,8045	511,0250	412,8236
5,5	443,7046	337,5390	702,2860	561,7881
6,5	642,9958	494,6659	926,3999	736,4560
7,5	873,5802	676,0909	1182,8441	936,3605
8,5	1135,3141	881,6405	1471,1126	1161,0276
9,5	1427,9673	1111,0691	1790,6993	1409,9694
10,5	1751,2357	1364,0650	2141,0856	1682,6772
11,5	2104,7498	1640,2563	2521,7316	1978,6167
12,5	2488,0812	1939,2145	2932,0694	2297,2237
13,5	2900,7469	2260,4580	3371,4995	2637,9007
14,5	3342,2121	2603,4545	3839,3872	3000,0145

TABELA A.2 – NÚMERO DE ONDA (cm⁻¹) - BANDA OH (8,3)

J	P ₁	Q ₁	R ₁	P ₂	Q ₂	R ₂
0,5	0,0000	0,0000	0,0000	13687,86	13741,70	0,0000
1,5	13664,25	13739,24	0,0000	13640,36	13729,51	13783,35
2,5	13618,38	13724,05	13799,05	13585,63	13709,46	13798,61
3,5	13565,67	13702,38	13808,05	13523,95	13681,80	13805,63
4,5	13506,05	13674,01	13810,71	13455,49	13646,75	13804,60
5,5	13439,49	13638,78	13806,74	13380,34	13604,45	13795,71
6,5	13366,03	13596,62	13795,91	13298,56	13555,00	13779,12
7,5	13285,72	13547,46	13778,04	13210,20	13498,46	13754,91
8,5	13198,62	13491,27	13753,01	13115,28	13434,86	13723,13
9,5	13104,78	13428,05	13720,70	13013,83	13364,22	13683,80
10,5	13004,26	13357,78	13681,05	12905,89	13286,54	13636,93
11,5	12897,12	13280,45	13633,97	12791,50	13201,83	13582,48
12,5	12783,42	13196,08	13579,41	12670,67	13110,10	13520,44
13,5	12663,19	13104,66	13517,32	12543,46	13011,35	13450,78
14,5	12536,51	13006,19	13447,66	12409,90	12905,58	13373,46

TABELA A.3 – COMPRIMENTOS DE ONDA NO VÁCUO (nm) - BANDA OH(8,3)

J	P ₁	Q ₁	R ₁	P ₂	Q ₂	R ₂
0,5	0,0000	0,0000	0,0000	730,5742	727,7121	0,0000
1,5	731,8369	727,8423	0,0000	733,1186	728,3580	725,5132
2,5	734,3017	728,6477	724,6877	736,0719	729,4234	724,7105
3,5	737,1547	729,8002	724,2150	739,4290	730,8980	724,3422
4,5	740,4090	731,3146	724,0757	743,1913	732,7754	724,3964
5,5	744,0758	733,2033	724,2839	747,3654	735,0536	724,8630
6,5	748,1651	735,4770	724,8525	751,9611	737,7349	725,7359
7,5	752,6876	738,1458	725,7925	756,9910	740,8250	727,0132
8,5	757,6549	741,2198	727,1136	762,4696	744,3321	728,6966
9,5	763,0803	744,7098	728,8256	768,4132	748,2667	730,7909
10,5	768,9786	748,6275	730,9383	774,8398	752,6414	733,3031
11,5	775,3667	752,9863	733,4622	781,7694	757,4706	736,2426
12,5	782,2635	757,8007	736,4089	789,2241	762,7706	739,6209
13,5	789,6902	763,0874	739,7914	797,2281	768,5598	743,4514
14,5	797,6702	768,8646	743,6240	805,8081	774,8589	747,7495

TABELA A.4 – COMPRIMENTOS DE ONDA NO AR (nm) - BANDA OH(8,3)

J	P ₁	Q ₁	R ₁	P ₂	Q ₂	R ₂
0,5	0,0000	0,0000	0,0000	730,3751	727,5138	0,0000
1,5	731,6374	727,6439	0,0000	732,9188	728,1595	725,3155
2,5	734,1016	728,4491	724,4902	735,8713	729,2246	724,5130
3,5	736,9538	729,6013	724,0177	739,2275	730,6988	724,1448
4,5	740,2073	731,1153	723,8783	742,9888	732,5757	724,1990
5,5	743,8730	733,0035	724,0866	747,1617	734,8533	724,6654
6,5	747,9612	735,2766	724,6550	751,7562	737,5339	725,5381
7,5	752,4824	737,9447	725,5947	756,7847	740,6231	726,8151
8,5	757,4484	741,0178	726,9155	762,2618	744,1293	728,4981
9,5	762,8723	744,5068	728,6270	768,2038	748,0628	730,5917
10,5	768,7690	748,4235	730,7391	774,6286	752,4363	733,1033
11,5	775,1554	752,7811	733,2623	781,5564	757,2641	736,0420
12,5	782,0504	757,5942	736,2082	789,0090	762,5627	739,4193
13,5	789,4750	762,8794	739,5897	797,0108	768,3504	743,2487
14,5	797,4528	768,6551	743,4214	805,5885	774,6477	747,5457

**TABELA A.5 – INTENSIDADES RELATIVAS (%) - BANDA OH(8,3)
MODELO TURNBULL E LOWE (T=190 K)**

J	P ₁	Q ₁	R ₁	P ₂	Q ₂	R ₂
0,5	0,0000	0,0000	0,0000	2,9456	1,4948	0,0000
1,5	9,7516	14,0423	0,0000	3,8836	0,4722	2,1137
2,5	11,0935	5,5017	6,0879	3,3011	0,1999	2,2388
3,5	8,2291	2,0612	5,6903	2,0719	0,0809	1,5296
4,5	4,6130	0,6878	3,4608	1,005	0,0281	0,7719
5,5	2,0400	0,1982	1,5858	0,3851	0,0085	0,3023
6,5	0,7244	0,0499	0,5726	0,1183	0,0021	0,0937
7,5	0,2090	0,0105	0,1661	0,0294	0,0004	0,0234
8,5	0,0494	0,0019	0,0392	0,006	0,0001	0,0047
9,5	0,0096	0,0003	0,0076	0,001	0,0000	0,0008
10,5	0,0015	0,0000	0,0012	0,0001	0,0000	0,0001
11,5	0,0002	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000
12,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
13,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
14,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Soma Total do Ramo P = 50,47 %
 Soma Total do Ramo Q = 24,84 %
 Soma Total do Ramo R = 24,69 %
 Soma Total dos Ramos P, Q e R = 100,0%

Os ramos P, Q e R são definidos no Capítulo 2, Seção 2.2.1.3 – Energia Rotacional.

**TABELA A.6 – COEFICIENTES DE EINSTEIN (s^{-1}) - BANDA OH(8,3)
MODELO LANGHOFF et al. (1986)**

J	P ₁	Q ₁	R ₁	P ₂	Q ₂	R ₂
0,5	0,000	0,000	0,000	0,293	0,135	0,000
1,5	0,180	0,236	0,000	0,277	0,029	0,117
2,5	0,255	0,097	0,096	0,277	0,014	0,131
3,5	0,247	0,052	0,121	0,282	0,009	0,131
4,5	0,263	0,032	0,126	0,289	0,006	0,127
5,5	0,276	0,021	0,123	0,298	0,005	0,120
6,5	0,288	0,015	0,118	0,306	0,004	0,112
7,5	0,299	0,011	0,110	0,315	0,003	0,103
8,5	0,309	0,009	0,102	0,324	0,003	0,094
9,5	0,319	0,007	0,094	0,332	0,002	0,086
10,5	0,329	0,006	0,085	0,341	0,002	0,077
11,5	0,338	0,005	0,077	0,349	0,002	0,069
12,5	0,346	0,004	0,069	0,357	0,002	0,061
13,5	0,354	0,003	0,061	0,364	0,002	0,054
14,5	0,362	0,003	0,053	0,371	0,001	0,046

FONTE: Langhoff et al. (1986).

**TABELA A.7 – COEFICIENTES DE EINSTEIN (s^{-1}) - BANDA OH(8,3)
MODELO MIES (1974)**

J	P ₁	Q ₁	R ₁	P ₂	Q ₂	R ₂
0,5	0,000	0,000	0,000	0,387	0,188	0,000
1,5	0,243	0,329	0,000	0,360	0,041	0,174
2,5	0,298	0,135	0,140	0,354	0,020	0,201
3,5	0,321	0,072	0,180	0,355	0,012	0,207
4,5	0,335	0,044	0,194	0,359	0,009	0,206
5,5	0,346	0,029	0,197	0,364	0,007	0,201
6,5	0,355	0,021	0,195	0,369	0,006	0,195
7,5	0,363	0,015	0,190	0,375	0,005	0,187
8,5	0,370	0,012	0,184	0,380	0,004	0,179
9,5	0,367	0,009	0,171	0,376	0,003	0,164
10,5	0,372	0,007	0,162	0,379	0,003	0,155
11,5	0,377	0,006	0,154	0,382	0,003	0,146
12,5	0,380	0,005	0,144	0,384	0,002	0,136
13,5	0,382	0,004	0,135	0,385	0,002	0,126
14,5	0,384	0,004	0,125	0,386	0,002	0,116

FONTE: Mies (1974).

**TABELA A.8 – COEFICIENTES DE EINSTEIN (s^{-1}) - BANDA OH(8,3)
MODELO TURNBULL E LOWE (1989)**

J	P ₁	Q ₁	R ₁	P ₂	Q ₂	R ₂
0,5	0,000	0,000	0,000	1,338	0,679	0,000
1,5	0,825	1,188	0,000	1,209	0,147	0,658
2,5	0,984	0,488	0,540	1,156	0,070	0,784
3,5	1,034	0,259	0,715	1,127	0,044	0,832
4,5	1,053	0,157	0,790	1,108	0,031	0,851
5,5	1,060	0,103	0,824	1,093	0,024	0,858
6,5	1,060	0,073	0,838	1,080	0,019	0,855
7,5	1,057	0,053	0,840	1,068	0,016	0,848
8,5	1,052	0,040	0,835	1,057	0,013	0,835
9,5	1,045	0,032	0,824	1,045	0,011	0,820
10,5	1,037	0,025	0,809	1,033	0,010	0,801
11,5	1,028	0,021	0,790	1,022	0,009	0,780
12,5	1,018	0,017	0,769	1,009	0,007	0,756
13,5	1,009	0,014	0,745	0,997	0,007	0,731
14,5	0,997	0,012	0,719	0,985	0,006	0,704

FONTE: Turnbull e Lowe (1989).

APÊNDICE B

DETERMINAÇÃO DA TAXA DE EMISSÃO VOLUMÉTRICA DA OH(8,3)

Para determinar a taxa de emissão volumétrica $V(8,3)$ da OH(8,3) é necessário supor que existe um equilíbrio fotoquímico entre a produção (P) e perda (L) da OH(8) para uma altitude fixa.

Considerando que $[OH(8)]$ é a concentração da OH(8), têm-se:

$$\frac{d [OH(8)]}{dt} = P - L = 0 \quad (B.1)$$

A produção e a perda da $[OH^*(8,3)]$, Equações (2.24) à (2.27) são determinadas pelas relações:

- para a produção:

$$P[OH^*(8,3)] = K_1[O_3][H] \quad (B.2)$$

- para a perda:

$$L[OH^*(8,3)] = [OH^*(8,3)] \{K_3[O] + K_4[N_2] + A_8\} \quad (B.3)$$

No equilíbrio fotoquímico a produção e a perda da OH(8,3) são iguais e podem ser expressas pelas relações:

$$K_2[O][O_2][M] = [OH^*(8,3)] \{K_3[O] + K_4[N_2] + A_8\} \quad (B.4)$$

$$[\text{OH}^*(8,3)] = \frac{K_2[\text{O}][\text{O}_3][\text{M}]}{K_3[\text{O}] + K_4[\text{N}_2] + A_8} \quad (\text{B.5})$$

onde, M é o terceiro corpo, que é expresso por : $[\text{M}] = [\text{N}_2] + [\text{O}_2]$.

Reescrevendo a Equação (B.5) em termos de $L(8) = K_3[\text{O}] + K_4[\text{N}_2] + A_8$, tem-se:

$$[\text{OH}^*(8,3)] = \frac{K_2[\text{O}][\text{O}_3][\text{M}]}{L(8)} \quad (\text{B.8})$$

A taxa de emissão volumétrica da $\text{OH}(v',v'')$ é dada por:

$$V(v',v'') = A(v',v'').[\text{OH}(v')] \quad (\text{B.9})$$

onde, $A(v',v'')$ é o coeficiente de Einstein e $[\text{OH}(v')]$ é a concentração da OH no nível vibracional v' .

Para a banda da $\text{OH}(8,3)$ a taxa de emissão volumétrica pode ser obtida pela equação:

$$V(8,3) = \frac{A(8,3).K_1[\text{H}][\text{O}_3]}{L(8)} \cdot \left[f(8) + \frac{f(9)\{A(9,8) + \sum_Q K_3^Q(9,8)[\text{Q}]\}}{L(9)} \right] \quad (\text{B.10})$$

onde, $f(v')$ representa a fração da produção devido ao nível v' e $L(v')$ representa a perda atmosférica total do nível v' . A perda total pode ser representada pela relação:

$$L(v) = A(v) + \sum_Q K_3^Q(v)[\text{Q}] \quad (\text{B.10})$$

onde, $A(v)$ é o coeficiente de Einstein e $K_3^Q(v)$ é o coeficiente total para remoção deste nível por todos os processos colisionais envolvendo as espécies Q, que são: O_2 , N_2 ou O.

APÊNDICE C

ARQUIVOS GERADOS PELOS PROGRAMAS DE AQUISIÇÃO E REDUÇÃO DE DADOS DO FOTÔMETRO PORTÁTIL

Neste Apêndice são apresentados dois arquivos gerados pelos programas desenvolvidos para a aquisição e redução dos dados do fotômetro portátil. O programa de aquisição dos dados, *Fotportatil.frm*, gera um arquivo para cada noite de observação, com o nome “aammddx.ifp” onde “aa” é o ano, “mm” o mês, “dd” o dia, “x” é um caracter adicional para especificar o arquivo original e “ipf” é a extensão deste arquivo.

Exemplo de arquivo gerado pelo programa de aquisição de dados é apresentado a seguir:

```
10-11-1999
pp
Sky Obs
20:01:47
ch: 0  292
ch: 1  308
≈
ch: 92  284
ch: 93  228
20:12:08
Cal Int
DN= 154
Jcal= 22172
Cal_Int= 22018
20:13:01
ch: 0  332
ch: 1  432
ch: 2  372
```

O arquivo gerado apresenta um pequeno cabeçalho contendo o dia "11-10-99", o nome do operador "pp" e o tipo de operação "Sky Obs". Após são registrados os canais (inclinação) do filtro "ch:" e suas respectivas contagens por segundo. No final de cada varredura do filtro é gravada a hora do sistema. Ao completar 24 varreduras, aproximadamente 10 minutos, é realizada a calibração interna do fotômetro portátil que registra a operação "Cal Int", o ruído térmico "DN", a contagem da fonte de luz "Jcal", o valor da calibração "Cal_int" e novamente, a hora do sistema. Após reinicia-se a varredura do filtro, onde são registrados os canais e as contagens por segundo.

O programa de redução, *Red_Fotportatil.frm*, foi desenvolvido para determinar a temperatura e intensidade da OH(8,3), utilizando o arquivo gerado pelo programa Fotportatil.frm. O formato do nome do arquivo de dados reduzido é "FPaammdd.dat", onde "FP" indica fotômetro portátil e os demais parâmetros indicam a data da observação. Um exemplo dos arquivos gerados por este programa é apresentado a seguir:

FOTÔMETRO PORTÁTIL

DATA: 991011

HORA	Modelos: I(OH)=[P ₁ (4)] T=[P ₁ (5)/P ₁ (3)](K)						BG_R/A
	(Langhoff)		(Mies)		(Turnbull)		
	T_Lang	I_Lang	T_Mies	I_Mies	T_Turn	I_Turn	
18.980	250	779	233	776	244	827	8.1
19.083	245	768	228	768	239	819	7.0
19.155	233	783	218	787	228	839	6.3
19.226	252	682	234	679	246	723	6.9
19.313	227	743	212	749	222	799	6.0
19.385	232	750	217	754	227	805	7.3
19.472	244	731	228	731	239	779	7.0
19.544	241	696	225	697	236	743	7.8
19.631	218	717	204	726	213	774	7.8
19.703	226	732	212	738	222	788	7.8
19.775	264	768	244	761	257	810	7.0
19.862	223	755	209	763	218	814	6.6
19.934	243	790	227	791	238	843	6.5

Os arquivos de saída apresentam um cabeçalho de identificação com o nome do fotômetro portátil, a data e os modelos utilizados no cálculo da intensidade, linha de emissão $P_1(4)$, e temperatura, razão entre as linhas $P_1(5)$ e $P_1(3)$ da $OH(8,3)$. A primeira coluna representa a hora no formato decimal e as colunas dois e três são respectivamente a temperatura e a intensidade da $OH(8,3)$ calculadas a partir dos coeficientes de Einstein determinados por Langhoff et al. (1986). As colunas quatro e cinco apresentam respectivamente a temperatura e a intensidade calculadas através dos coeficientes de Einstein determinados por Mies (1974). As colunas seis e sete apresentam os mesmos parâmetros calculados com os coeficientes de Einstein determinados por Turnbull e Lowe (1989). A coluna oito representa o ruído de fundo do céu noturno em $R/\text{Å}$.