



Metodologia para a determinação da temperatura da mesosfera superior usando um Espectro-Imageador

José Valentin Bageston, Delano Gobbi, Hisao Takahashi, Cristiano Max Wrasse, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE, Brazil.

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

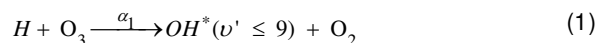
In this work we'll present a new methodology to calculate the temperature in the upper mesosphere. For this propose was determined the instrumental characteristics and was made the acquisition airglow data. The instrument consist of the imaging spectrometer that selected a wavelength range of the OH(6-2) airglow emission in interference cycles pattern which are show in image form. The airglow data was obtained at INPE observatory site located at Cachoeira Paulista (22.7°S, 45.0°W), Brazil. The application this methodology resulted temperature values that agree with temperature values observed in the upper mesosphere.

Introdução

A determinação da temperatura na região da mesosfera superior (80-100km) é muito importante, pois, além do conhecimento da estrutura térmica da atmosfera, esta variável pode ser usada para monitoramento das possíveis mudanças climáticas globais (Roble and Dickison, 1989; Rind et al., 1990; Golitsyn et al., 1996). Além disso, a temperatura é muito importante no conhecimento de processos dinâmicos e do balanço de energia na Mesosfera e Baixa Termosfera, região denominada MLT (Takahashi et al., 2003).

O processo de cálculo da temperatura na região da mesosfera superior, a partir da emissão do radical hidroxila (OH), já está bem estabelecido, sendo que as primeiras indicativas do uso desta emissão para o cálculo da temperatura vêm de Meinel em 1950. Desde então, diversos trabalhos vêm utilizando este meio para a determinação da temperatura na mesosfera superior, como por exemplo: Takahashi et al. (1974); Buriti et al. (2000); Wrasse (2000); Phillips et al. (2004).

A emissão das bandas do OH* é originada de transições vibro-rotacionais, dentro de um mesmo estado eletrônico $^2\Pi$. O mecanismo mais aceito para a produção da hidroxila no estado excitado (OH*) foi proposto por Bates e Nicolet em 1950 e segue a seguinte reação:



Assume-se que a intensidade espectroscópica da emissão do OH* segue a distribuição de Boltzman para os níveis rotacionais, como descrita na seguinte equação:

$$I(i', J', v' \rightarrow i'', J'', v'') = N_{v'} A_{v'}(i', J', v' \rightarrow i'', J'', v'') \frac{2(2J'+1)}{Q_{v'}} \times \exp\left(-\frac{GF_i(J', v')}{kT_r}\right) \quad (2)$$

o índice ' representa o nível superior de energia e '' o nível inferior de energia, i representa o estado eletrônico, v o estado vibracional e J o estado rotacional de energia. O número $N_{v'}$ representa a população de moléculas no nível superior de energia, $A_{v'}$ são as probabilidades de transições (ou coeficientes de Einstein) entre dois níveis de energia, $Q_{v'}$ é a função partição de energia, $(2J'+1)$ representa a degenerescência do estado J' , GF é a energia total do estado superior de energia, k é a constante de Boltzman e T_r é a temperatura rotacional.

A Figura 1 mostra o espectro teórico do OH(6-2), o qual foi calculado usando a Equação (1). Neste espectro foram usados os coeficientes de Einstein calculados por Langhoff et al. (1986) e as constantes moleculares dadas por Coxon e Foster (1982).

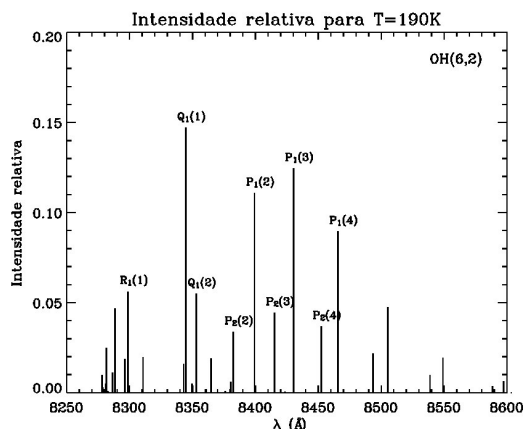


Figura 1: Espectro teórico do OH (6, 2), onde são destacadas algumas linhas rotacionais.

Geralmente, a temperatura rotacional é determinada através do quociente entre duas linhas rotacionais, escolhidas de modo a apresentarem suficiente sensibilidade à variação da temperatura. A temperatura rotacional, por sua vez, deve representar a temperatura cinética dos gases próximo a 87km de altitude (pico de emissão do OH), uma vez que nessa altitude o processo de relaxação do OH* é suficientemente rápido (Takahashi, 1981).

Instrumentação

A instrumentação utilizada neste trabalho consiste de um espectro-imageador, nomeado FotAntar-3. O arranjo óptico do equipamento fornece um padrão de imagens com anéis de interferência, os quais representam as linhas de emissão do OH(6-2) selecionadas pelo filtro.

Na Figura 2 é apresentada uma foto do FotAntar-3, onde estão destacados seus principais componentes, juntamente com um exemplo de imagem adquirida pelo instrumento.

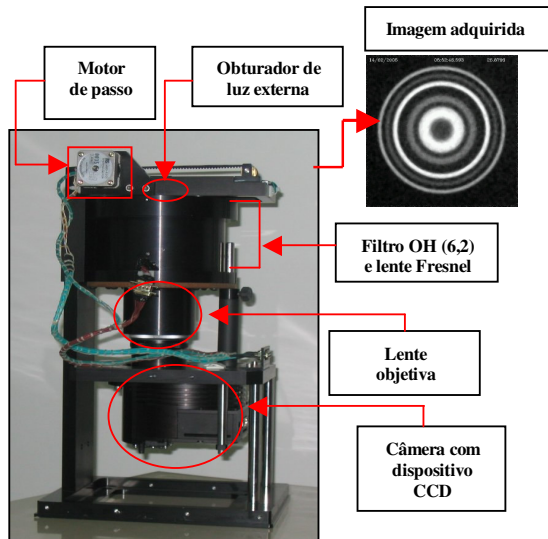


Figura 2: Espectro-imageador FotAntar-3 com seus componentes e no canto superior direito uma imagem adquirida pelo instrumento.

A formação dos anéis de interferência na imagem gerada pelo instrumento FotAntar-3 está fundamentada no princípio físico de funcionamento do Fabry-Perot etalon, que é descrito pela seguinte equação (James, 1969):

$$2d \cos(\theta) = m\lambda \tag{3}$$

onde $m=1, 2, 3, \dots$ d é a distância entre as placas do Fabry-Perot e θ o ângulo de incidência da luz.

O sistema detector é um dispositivo CCD, o qual converte fótons em pulsos elétricos que são reconstruídos na forma de imagem. Este sensor CCD está acoplado a uma câmera que transfere as informações para um computador e que posteriormente, estas podem ser analisadas. A CCD é mantida refrigerada para diminuir o ruído térmico do detector, o que garante uma maior estabilidade do sistema.

A parte óptica do sistema é composta, basicamente, por um sistema de lentes (lente Fresnel e objetivas) e por um filtro de interferência, o qual é mantido à uma temperatura constante de aproximadamente 20 °C, de forma a manter as características das linhas espectrais que são medidas. O instrumento também é caracterizado por possuir um estreito campo de visão (23,6°). A série de anéis gerada pelo sistema imageador relaciona-se aos diferentes ângulos de incidência da luz sobre o filtro.

Na Figura 3 é mostrado um diagrama óptico do equipamento, o qual ilustra suas principais características.

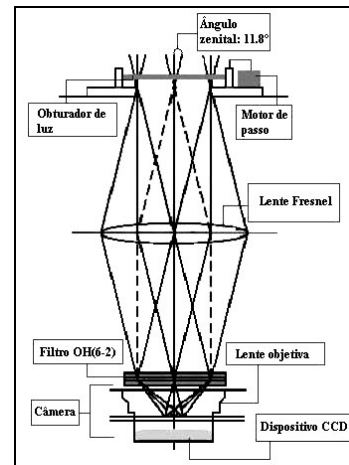


Figura 3: Diagrama óptico do sistema FotAntar-3.

O conjunto de lentes é composto por uma lente Fresnel, e um conjunto de lentes objetivas. A lente Fresnel tem o objetivo de uniformizar a luz do céu escuro; enquanto que a lente objetiva faz com que a luz colimada pela lente Fresnel seja focalizada sobre a CCD.

O filtro usado no equipamento tem a função de selecionar uma parte do espectro da aeroluminescência do OH(6-2). Os comprimentos de onda selecionados correspondem a determinadas linhas rotacionais da emissão e são representados na imagem na forma de anéis de interferência. As linhas de emissão selecionadas pelo filtro e seus respectivos comprimentos de onda são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Linhas de emissão selecionadas pelo filtro

Linhas rotacionais	P ₁ (2)	P ₂ (3)	P ₁ (3)	P ₂ (4)	P ₁ (4)
$\lambda(\text{Å})$	8399	8415	8430	8452	8465

Além das partes descritas acima, acoplou-se ao sistema imageador um obturador externo de luz, o qual é acionado por um motor de passo. O obturador tem a função de não deixar entrar luz para o interior do equipamento, no momento da aquisição das imagens de ruído (*dark noise*), para que posteriormente este ruído seja subtraído da imagem original de aeroluminescência.

Metodologia

Para calcular a temperatura rotacional, a partir das imagens do espectro-imageador é necessário conhecer as características instrumentais, as quais são determinadas a partir da calibração do equipamento. Além de conhecer as características instrumentais é preciso conhecer o espectro teórico (Figura 1) para então poder determinar a temperatura através da análise do espectro observado do OH. A descrição do processo de calibração está apresentada a seguir.

Calibração espectral

A calibração espectral do instrumento consiste basicamente em conhecer as curvas de transmitância do filtro utilizado e como consequência disso calcular as larguras efetivas do filtro em cada posição espectral.

Devido a simetria das imagens geradas pelo instrumento, as coordenadas cartesianas (x,y) da imagem são convertidas para coordenadas polares (r, φ).

Na Figura 4 são apresentados três anéis de interferência, obtidos individualmente com o uso de um monocromador juntamente com as respectivas curvas de transmissão, normalizadas pela contagem do anel mais central, região de maior sensibilidade da imagem e consequentemente uma maior contagem.

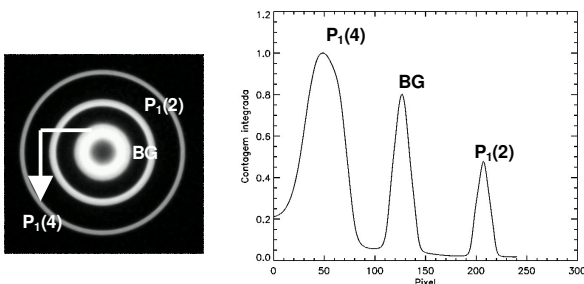


Figura 4: Resposta do instrumento para três comprimentos de onda distintos.

As curvas, como as mostradas no gráfico da Figura 4, são geradas a partir de um centro estimado para os anéis de interferência. O método para calcular este centro foi desenvolvido para que este fosse o mais próximo do centro dos anéis. A partir deste centro é feita uma integração dos anéis (em 360° para cada raio - pixel a partir do centro) que aparecem na imagem, de forma que cada curva, como a mostrada na Figura 4, represente a intensidade relativa total de cada anel de interferência.

As posições espectrais dos anéis estão relacionadas com o ângulo de incidência da luz no filtro, de acordo com a seguinte equação (Eather e Reasoner, 1969):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cong -\frac{1}{2\eta} \theta^2 \tag{4}$$

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

A Equação (4) mostra o comportamento do deslocamento ($\Delta\lambda$) dos anéis em relação ao ângulo de entrada de luz no filtro (θ).

Dessa forma, para representar as posições, em raio, da imagem em comprimento de onda, foi construído um polinômio, a partir de um conjunto de imagens de monocromador (comprimentos de onda conhecidos).

A Figura 5 ilustra graficamente os dados do monocromador e o ajuste polinomial realizado para a estimar as posições da imagem em comprimento de onda.

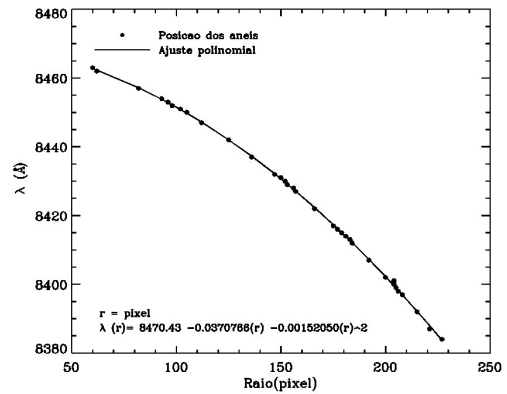


Figura 5: Função polinomial que relaciona o raio (pixel) de um dado anel de interferência com o comprimento de onda deste anel.

Uma das importantes características do instrumento são as curvas de transmissão do filtro (Figura 6), as quais foram levantadas para 36 posições espectrais, fazendo-se uso de um monocromador. Estas curvas de transmissão são usadas, juntamente com o espectro teórico (Figura 1), para calcular a temperatura rotacional.

Um exemplo de curvas de transmissão, nas posições espectrais das linhas P₁(2), P₁(4) e ruído da imagem (BG), é mostrado na Figura 6.

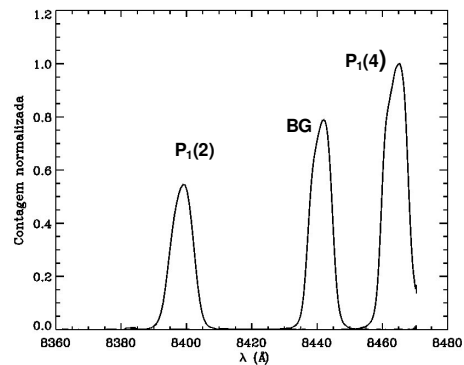


Figure 6: Contagens normalizadas em função de comprimento de onda. Estas contagens são referentes aos anéis de interferência mostrados na Figura 4.

A partir das curvas de transmissão também é encontrada uma outra característica do filtro, a largura efetiva ($\Delta\lambda_{\text{eff}}$) para as posições espectrais de cada curva de transmissão. Para determinar a largura efetiva é tomada a contagem normalizada para cada anel de interferência obtido com o monocromador, e então calculada a área sob esta curva. Esta área representa então a largura efetiva para esta dada posição espectral (comprimento de onda no centro da curva).

As larguras efetivas do filtro para diferentes posições espectrais são mostradas na Figura 7, juntamente com uma função de ajuste linear para o conjunto de todas as posições espectrais da imagem.

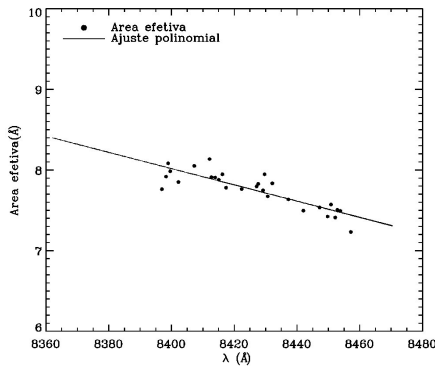


Figura 7: Larguras efetivas (Å) do filtro para diferentes posições espectrais e ajuste linear que descreve a largura efetiva para todas as posições espectrais do filtro.

Calibração de Sensibilidade

A determinação da sensibilidade do equipamento para cada posição (cada pixel ou comprimento de onda) da imagem foi feita uma esfera integradora (2m de diâmetro) pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisa Polar (NIPR), no Japão. Esta esfera foi iluminada internamente com uma lâmpada padrão de calibração. A radiação emitida pela superfície interna da esfera é aproximadamente uniforme e conhecida para diferentes comprimentos de onda.

A sensibilidade é obtida, usando os valores de radiação característicos da esfera integradora, as contagens integradas medidas pelo equipamento e as larguras efetivas calculadas no processo de calibração de espectral. Dessa forma, pode-se obter a sensibilidade para cada pixel (ou comprimento de onda) usando a seguinte equação:

$$S(\lambda_{ag}) = \frac{J_{int}}{B_{\lambda}^{(int)}(\lambda_{ag}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} t(\lambda) d\lambda} \tag{5}$$

onde, J é a contagem integrada dividida pelo tempo de exposição da imagem, B é a radiação e a integral representa a largura efetiva do filtro.

Um exemplo de imagem obtida na esfera integradora é mostrado na Figura 8(a) juntamente com um perfil de sensibilidade, Figura 8(b), para todas as posições espectrais da imagem.

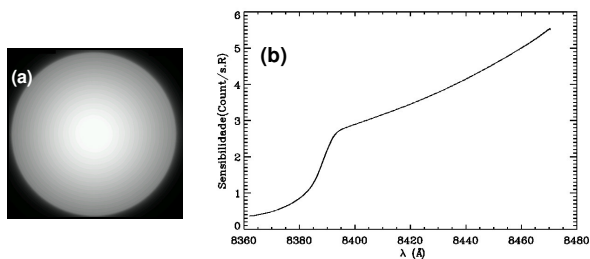


Figura 8: Imagem obtida na esfera integradora (a), usada na calibração de sensibilidade e a sensibilidade (b) para todas as posições espectrais da imagem.

Pela calibração de sensibilidade observa-se que a sensibilidade do equipamento diminui do centro para a borda das imagens, como pode ser visto na Figura (b).

Os valores de largura efetiva do filtro e sensibilidade para algumas posições espectrais da imagem são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros da calibração instrumental

Posição espectral	λ (Å)	$\Delta\lambda_{eff}$ (Å)	S(Count/s.R)
P ₁ (2)	8399	8.03	2.88
P ₁ (4)	8465	7.36	5.28
BG	8440	7.56	4.17

No processo de cálculo da temperatura serão usados os resultados da calibração mostrados na Tabela 2, juntamente com as intensidades relativas teórica e os dados observacionais. O processo do cálculo da temperatura será descrito na seção seguinte.

Cálculo da temperatura rotacional

A metodologia utilizada neste trabalho para o cálculo da temperatura rotacional é o quociente de duas linhas rotacionais. Dessa forma, para calcular a temperatura rotacional do OH será observado o espectro noturno do OH(6-2) com o espectro-imageador FotAntar-3.

A escolha do par de linhas que será usado no cálculo da temperatura foi baseada na sensibilidade à variação da temperatura do quociente teórico da intensidade relativa das linhas rotacionais selecionadas pelo FotAntar-3, além das informações de contaminação por outras linhas espectrais. Um estudo teórico realizado mostrou que o par de linhas rotacionais que apresenta uma maior sensibilidade à variação da temperatura é P₁(4)/P₁(2). Além disso, a escolha desse par de linhas é baseado no fato dessas linhas rotacionais não sofrerem contaminação de outras linhas, como é o caso da linha P₁(3) que é contaminada pelas linhas P₁(12) e P₂(12) da banda OH(5-1) e esta contaminação é difícil de ser estimada (Takahashi et al., 2003). Dessa forma, serão usadas as linhas P₁(4) e P₁(2) para o cálculo da temperatura rotacional.

Na Figura 10 é apresentado um exemplo de imagem de aeroluminescência da banda OH(6-2) obtida com o espectro-imageador FotAntar-3. Nesta figura já foi subtraído o ruído do equipamento (*dark noise*) e estão destacadas as linhas espectrais P₁(4) e P₁(2), além da região de BG (ruído do contínuo de fundo). Os círculos sobre a imagem foram construídos a partir de um centro calculado, para visualizar se este centro representa de forma razoável o centro dos anéis.

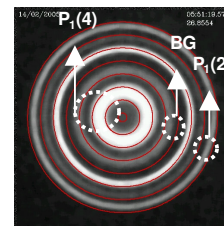


Figure 10: Espectro obtido com o FotAntar-3 em Cachoeira Paulista.

A curva de contagem integrada correspondente aos anéis de interferência mostrados na Figura 10 é apresentado na Figura 11. Nesta figura estão nomeadas todas as linhas de emissão mostradas na imagem, deste perfil já foi subtraído o BG.

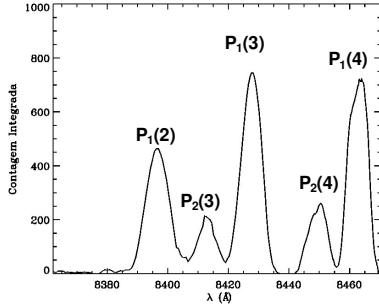


Figure 11: Perfis de contagens integradas para a imagem mostrada na Figura 10.

Os dados observacionais usados no cálculo da temperatura são as contagens integradas sobre toda a região dos anéis $P_1(2)$ e $P_1(4)$, ou seja, a áreas sob as curvas $P_1(2)$ e $P_1(4)$ mostradas na Figura 11. Além disso, é usado o valor de contagem na posição do BG (raio 130 pixel $\sim \lambda=8440\text{Å}$).

Além dos dados observacionais, citados acima, para o cálculo da temperatura rotacional, é necessário possuir as características do equipamento de medida (curvas de transmissão e sensibilidades), as intensidades teóricas das linhas que serão usadas e as larguras efetivas nas posições espectrais de interesse (Tabela 2).

O método para o cálculo da temperatura rotacional, propriamente dita, consiste em a partir do espectro teórico (intensidade relativas) e da calibração espectral (curvas de transmissão normalizadas) construir um polinômio de ajuste da razão teórica das intensidades relativas $P_1(4)$ e $P_1(2)$ em função da temperatura. Esta razão teórica é dada pela seguinte expressão:

$$\left. \frac{P_1(4)}{P_1(2)} \right|_{\text{Teórico}} = \frac{\sum_{\alpha} I'_{\alpha} \cdot (t_1)_{\alpha}}{\sum_{\beta} I'_{\beta} \cdot (t_2)_{\beta}} \quad (6)$$

onde α representa todas as linhas rotacionais sob a curva de transmissão na posição $P_1(4)$; β todas as linhas rotacionais sob a curva de transmissão na posição $P_1(2)$; os subscritos "1" e "2" representam as posições $P_1(4)$ e $P_1(2)$ respectivamente; I' são as linhas rotacionais teóricas e t são as curvas de transmissão.

Como se sabe que as intensidades espectrais variam com a temperatura (Equação 1), então, para calcular a razão teórica (Equação 6) variou-se a temperatura entre 140K e 260K, uma vez que a temperatura da região da mesosfera superior varia nesse intervalo (She et al. 1998; Takahashi et al. 2003). Dessa forma, usou-se a razão $P_1(4)$ por $P_1(2)$ das intensidades teóricas e construiu-se um polinômio para a temperatura em função desta razão teórica, ou seja, $T=F(P_1(4)/P_1(2))$.

Os valores de entrada no polinômio que resulta na temperatura estão associados aos parâmetros de calibração, determinados em laboratório, e aos dados observacionais. Estes valores são calculados para cada imagem de acordo com a Equação 7, que pela teoria da resposta do espectro imageador a uma dada luz recebida, é igual à Equação 6. Assim, pode-se usar a razão observada como entrada no polinômio construído a partir da Equação 6.

$$\left. \frac{P_1(4)}{P_1(2)} \right|_{\text{Observado}} = \frac{S_2 \Delta\lambda_{\text{eff}}^{(2)} J_1 - A_1 \cdot J_{BG}}{S_1 \Delta\lambda_{\text{eff}}^{(1)} J_2 - A_2 \cdot J_{BG}} \quad (7)$$

onde o subscrito "1" indica a posição da linha de emissão $P_1(4)$ e o subscrito "2" da linha $P_1(2)$; BG a posição de onde será subtraído o ruído de fundo da imagem; S é a sensibilidade para cada posição; J_1 e J_2 são as contagens integradas (contagens para toda a área do anel) $P_1(4)$ e $P_1(2)$ respectivamente e J_{BG} é a contagem integrada na posição do BG. Os valores A_1 e A_2 estão associados aos parâmetros instrumentais.

A Figura 12 mostra a variação da temperatura em função da razão teórica $P_1(4)$ por $P_1(2)$ e o ajuste polinomial para encontrar os coeficientes do polinômio para o cálculo da temperatura rotacional.

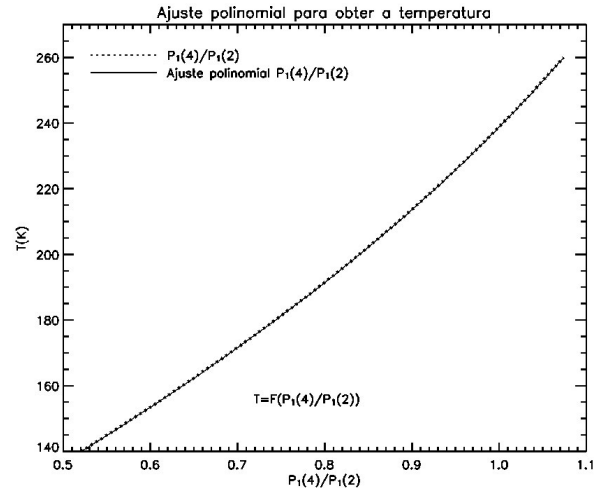


Figure 12: Ajuste polinomial para determinar a temperatura rotacional a partir da razão $P_1(4)/P_1(2)$.

Resultados preliminares

A partir de alguns dados observacionais, foi testada a metodologia descrita neste trabalho, à qual forneceu alguns resultados, os quais estão dentro da faixa de temperatura medida na alta mesosfera (Shiokawa et al., 2004). Os valores de temperatura obtidos para a noite de 13-14 de Fevereiro de 2005, entre 00:52:32 e 02:54:05 em hora local, são mostrados na Figura 13.

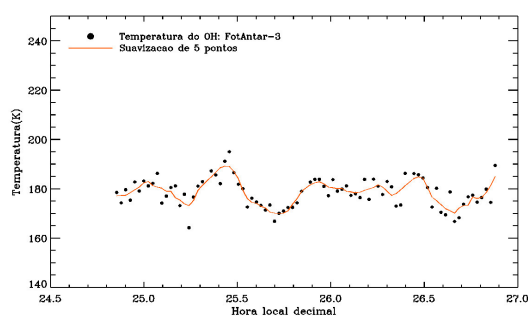


Figura 13: Temperatura rotacional calculada para a noite de 13-14 de Fevereiro de 2005 em Cachoeira Paulista.

Os resultados obtidos ainda estão em análise e serão comparados com dados de um fotômetro multicanal de filtro inclinável. A partir de uma análise cuidadosa dos resultados serão feitos aprimoramentos na metodologia utilizada, a fim de determinar a temperatura com a maior confiabilidade possível.

Sumário

O espectro-imageador de temperatura, FotAntar-3, foi desenvolvido para observar a emissão de aeroluminescência da banda OH(6-2). Através da calibração espectral e de sensibilidade, e da metodologia desenvolvida para o cálculo da temperatura rotacional do OH, obteve-se os primeiros resultados de temperatura com este instrumento. As comparações destes resultados com resultados de outro instrumento (fotômetro de filtro inclinável) ainda serão necessárias para checar e validar o FotAntar-3.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. K. Shiokawa da Universidade de Nagoya, Japão, pela concepção do sistema imageador, juntamente com o Dr. H. Takahashi. Aos senhores Tsutsumi e Taguchi por sua ajuda durante o experimento de calibração. Também agradecemos aos técnicos do grupo Lume do INPE que colaboraram no suporte técnico e na aquisição de dados. Ao CNPq pelo suporte financeiro ao projeto.

Referencias

Buriti, R. A.; Nakamura, T.; Tsuda, T.; Fukao, S.; Tsutsumi, M.; Takahashi, H.; Batista, P. P. Mesopause Temperature observed by airglow OH spectra and meteor echoes at Shigarhaki (34.9°N, 131.6°E), Japan. *Adv. Space Res.* Vol. 26, N° 6, pp. 1005-1008, 2000.

Coxon, J. A. and Foster, S. C. Rotational analysis of hydroxyl vibration-rotation emission bands: molecular constants for OH X²Π, 6 ≤ v ≤ 10. *Can. J. Phys.*, Vol. 60, N° 41, pp. 41-48, 1982.

Eather, R. H.; Reasoner, D. L. Spectrophotometry of faint light sources with tilting-filter photometer. *Appl. Optics*, Vol.8, N° 2, pp. 227-242, 1969.

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

James, J. F. and Sternberg, R. S. The design of optical spectrometers. London, Chapman and Hall Ltd, 1969.

Langhoff, S. R.; Werner H. J. and Rosmus, P. Theoretical transitions probabilities for the OH Meinel system. *J. Mol. Spectros.*, Vol. 188, pp. 507-529, 1986.

Phillips, F.; Burns, G. B.; French, W. J. R.; Williams, P. F. B.; Klekociuk, A. R. and Lowe, R. P. Determining rotational temperatures from the OH (8-3) band, and a comparison with OH (6-2) rotational temperatures at Davis, Antarctica. *Annales Geophysicae*, Vol. 22, pp. 1549-1561, 2004.

Rind, D.; Suozzo, R.; Balachanan, N. K. and Prather, M. J. Climate changes and the middle atmosphere. Part 1: the doublet CO₂ climate. *J. Atmosph. Sci.*, Vol. 47, pp. 475-494, 1990.

Roble, R. G. and Dickison, R. F. How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 16, pp. 1441-1444, 1989.

She, C. Y.; Lowe, R. P. Seasonal temperature variations in the mesopause region at mid-latitude: comparison of lidar and hydroxyl rotational temperature using WINDII/UARS OH Height profiles. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 60, pp. 1573-1583, 1998.

Shiokawa, K.; Otsuka, Y.; Ogawa, T.; Takahashi, H.; Nakamura, T.; Shiomomai, T. Comparison of OH rotational temperature measured by the spectral airglow temperature imager (SATI) and by a tilting-filter photometer. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 66, pp. 891-897, 2004.

Takahashi, H.; Clemesha, B. R. and Sahai, Y. Nightglow OH (8, 3) band intensities and rotational temperature at 23°S. *Planetary and Space Science*, Vol. 22, N° 9, pp. 1323-1329, 1974.

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, pp.127. (INPE 2046-DTL/50). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1981.

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*, Vol. 51, N° 7 e 8, pp. 863-875, 1999.

Takahashi, H.; Tsuda, T.; Nakamura T.; Isoda F.; Scheer J. and Hoffermand D. The lowest mesopause temperature in 1996 and 1997 at 23°S. *Adv. Space Res.* Vol. 32, N° 9, pp. 1781-1786, 2003.

Wrasse, C. M. Observação da temperatura rotacional da Hidroxila através da aeroluminescência na região da mesosfera terrestre. São José dos Campos, p. 125. (INPE 8003-TDI/751). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.