

# O Perfil de Temperatura na Região da Mesopausa em São José dos Campos Obtido com Radar de Laser

M.P.P.M. Jorge  
B.R. Clemesha  
P.P. Batista  
D.M. Simonich

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, C.P.515, CEP:12.201-970, S.J.Campos, SP, Brasil.

Este artigo trata da obtenção do perfil de temperatura atmosférica entre 80 e 100 km de altura, região da mesopausa. Ele é baseado no desenvolvimento e aprimoramento de uma técnica experimental simples que permite determinar a temperatura da atmosfera utilizando um radar de laser e as propriedades físicas do sódio mesosférico. A técnica consiste em sintonizar o radar de laser na linha  $D_2$  do sódio (5890 Å) e substituir o espelho de saída do laser por um interferômetro Fabry-Perot com "free-spectral-range" de 1,98 pm, mesmo valor da separação da estrutura hiperfina da linha  $D_2$  do sódio. Inicialmente um controlador de temperatura permite variar a temperatura do Fabry-Perot e realizar uma varredura em comprimento de onda na estrutura hiperfina do sódio. Posteriormente um Fabry-Perot controlado por pressão permite mudar o comprimento de onda do laser do máximo para o mínimo da estrutura hiperfina. A temperatura do sódio, ou da atmosfera, uma vez que estão em equilíbrio termodinâmico, é inferida da convolução entre o perfil do laser e o perfil ressonante do sódio.

This paper is about the acquisition of the temperature profile between 80 and 100 km, in the mesopause region. It is based on the development and improvement of a simple experimental technique that enable determine the atmospheric temperature using a lidar and the physical properties of the mesospheric sodium. The technique consist in tune the lidar in the  $D_2$  line of the sodium (5890 Å) and substitute the output mirror of the laser for a Fabry-Perot interferometer which has the free-spectral-range of 1.98 pm, same value of the separation between the hyperfines components of the  $D_2$  line. Inicialy a temperature controler permits to vary the Fabry-Perot temperature and to do a wavelenght sweeping in the hyperfine structure of the sodium. Subsequently a Fabry-Perot with pressure control enable to change the laser wavelenght between the maximun and the minimun of the hyperfine structure. The sodium, and the atmospheric temperature, once they are in termodinamic equilibrium, are deduced from the convolution between the the laser spectrum and the sodium ressonance profile.

## INTRODUÇÃO

No estudo da atmosfera terrestre, a região entre 20 e 100 km de altura tem recebido grande atenção devido à ênfase que vem sendo dada às mudanças globais. Esta região contém a maior parte do ozônio da atmosfera da Terra e é muito sensível aos efeitos do aumento nas concentrações de  $CO_2$  e  $CH_4$  na troposfera. Estudos recentes mostram que dobrando-se essas concentrações ocorre uma diminuição de 10 a 20°C na temperatura da média atmosfera (Roble e Dickinson, 1989). A média atmosfera apresenta uma série de características importantes e interessantes onde o conhecimento da temperatura em função da altura é muito importante. Sua importância é comprovada na influência que exerce nas constantes de taxa de reações químicas, nos processos de excitação da luminescência e na formação de nuvens noctilucentes.

As primeiras medidas da temperatura mesosférica foram feitas a partir do espalhamento da luz solar pelos átomos de sódio da alta atmosfera, utilizando a técnica de absorção desenvolvida por Bricard e Kastler (1944). A técnica de absorção foi utilizada nas décadas de 60 e 70, também em nuvens de sódio artificiais lançadas por foguetes (Blamont *et al.*, 1961; Chanin, 1965). Com o surgimento dos lasers, a técnica de absorção passou a ser uma técnica ativa utilizando um laser como fonte de excitação dos átomos de sódio (Blamont *et al.*, 1972; Megie *et al.*, 1978). Esta técnica, apesar da simplicidade, apresentava dificuldades na calibração da célula de

absorção e pouca precisão nos valores de temperatura, fatores que contribuíram para a sua substituição.

Em 1979, Gibson *et al.* (1979) propuseram uma nova técnica para medir a temperatura da região da mesopausa, que consistia em medir o alargamento Doppler do perfil de ressonância dos átomos de sódio, o qual depende sensivelmente da temperatura em que esses átomos se encontram. O experimento consistia em realizar uma varredura em frequência ao redor da linha  $D_2$  do sódio e medir a razão entre o sinal do sódio (82 a 98 km) e o sinal do espalhamento Rayleigh (28 a 30 km), obtendo a temperatura diretamente da medida da largura Doppler do perfil da ressonância dos átomos de sódio. Esta técnica foi utilizada e aperfeiçoada por vários pesquisadores que passaram a medir o sinal do sódio somente em duas frequências, no pico da linha  $D_{2a}$  e no mínimo entre  $D_{2a}$  e  $D_{2b}$ , obtendo a temperatura da razão entre esses sinais (Frick e von Zhan, 1985; von Zhan *et al.*, 1987; She *et al.*, 1990; Bills *et al.*, 1991; She *et al.*, 1992). No entanto, devido ao alto custo e complexidade do transmissor utilizado nesta técnica, sua possibilidade de uso ficou restrita aos países do primeiro mundo.

No INPE um radar de laser é utilizado desde 1969 (Clemesha e Rodrigues, 1971) atuando principalmente nas medidas de aerossóis estratosféricos por espalhamento Mie e da concentração de sódio mesosférico por espalhamento ressonante (Clemesha e Simonich, 1978; Clemesha, 1984). O estudo da dinâmica da região da mesopausa também tem se desenvolvido a partir da análise das componentes de

marés e ondas de gravidade (Batista *et al.*, 1985, 1990) e do extenso conjunto de dados sobre a camada de sódio (Clemesha *et al.*, 1992). Quanto às medidas de temperatura, se limitam à região de 30 a 70 km e são determinadas a partir do perfil de densidade atmosférica obtido pelo espalhamento Rayleigh das moléculas da atmosfera (Batista *et al.*, 1995). Para determinar a temperatura na região da mesopausa, entre 80 e 100 km, foi desenvolvida uma técnica experimental simples que está descrita a seguir.

#### DESCRIÇÃO DA TÉCNICA EXPERIMENTAL

Na região da mesopausa, o perfil ressonante dos átomos de sódio é alargado principalmente pela velocidade dos átomos (efeito Doppler), uma vez que o tempo de vida do estado excitado (da ordem de  $10^{-8}$  s) é muito menor que o tempo entre colisões (da ordem de  $10^{-3}$  s). Como a largura Doppler depende da temperatura, as técnicas experimentais partiram para obter a sua medida como uma forma precisa de determinar a temperatura dos átomos de sódio. Uma vez que esses átomos encontram-se em equilíbrio termodinâmico com a atmosfera, a temperatura do sódio é equivalente a temperatura da atmosfera na região da mesopausa.

Para medir o alargamento Doppler da estrutura hiperfina dos átomos de sódio, é necessário que o laser utilizado no radar seja bastante estável e com largura de linha bem menor que este alargamento. No radar de laser do INPE o transmissor é um laser de corante da Candela, bombeado por lâmpadas de descarga, com largura de banda larga, o que impede a medida direta do alargamento Doppler da estrutura hiperfina. Para diminuir a largura de linha do laser Candela de forma a medir o alargamento Doppler seria necessário utilizar outros elementos de sintonia que causam oscilações em múltiplos comprimentos de onda e que requerem complexos sistemas de controle. Uma solução mais simples foi produzir um espectro com várias linhas cuja separação é a mesma da estrutura hiperfina da linha  $D_2$  do sódio. Para isso, o espelho de saída do laser Candela foi substituído por um interferômetro Fabry-Perot, com "free-spectral-range" de 1,98 pm, que produz o espectro desejado. A figura 1 mostra o espectro do laser com o Fabry-Perot, sobreposto a estrutura hiperfina da linha  $D_2$  do sódio.

A resposta medida pelo radar de laser é dada pela convolução entre o perfil do laser com o Fabry-Perot e o perfil ressonante do sódio, como pode ser visto na figura 2.

Como pode ser visto na figura 2, o valor mínimo da resposta da radar depende da temperatura em que os átomos se encontram, de forma que a partir da razão entre a resposta do radar no ponto de mínimo e no ponto de máximo é possível determinar esta temperatura.

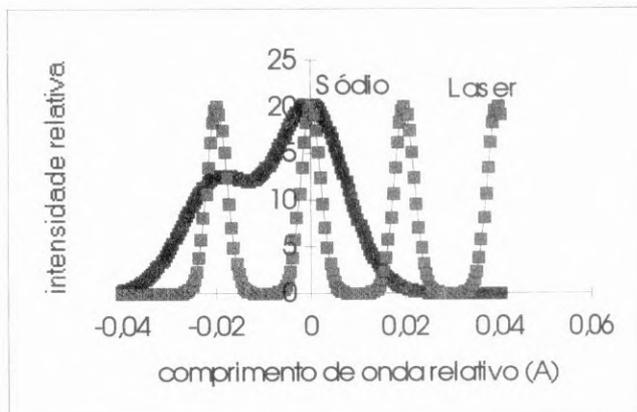


Fig. 1 - Espectro do laser com o Fabry-Perot sobreposto à ressonância  $D_2$  do sódio.

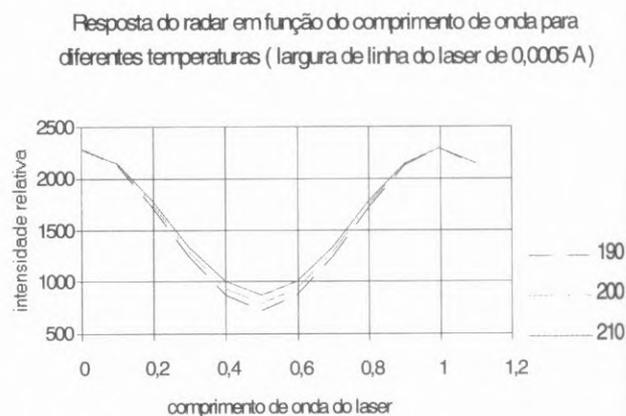


Fig. 2 - Resposta do radar de laser para três temperaturas dos átomos de sódio.

#### Perfil de Temperatura em 17/10/96 Dados das 21:18 até 23:57

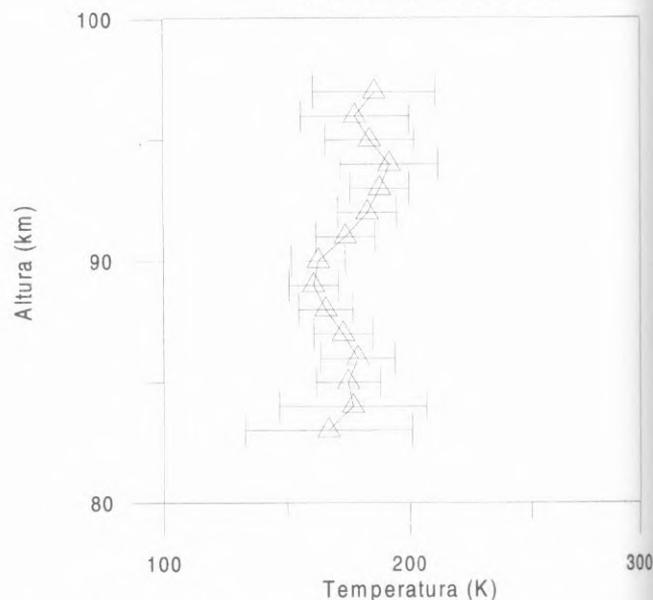


Fig. 3 - Perfil de temperatura atmosférica em 17/10/96.

O perfil de temperatura acima mostra valores relativos bastante confiáveis, apesar do erro nos valores absolutos ser de ~8 K, no pico da camada, devido às grandes variações que ocorreram na densidade de sódio nesta noite. Entre 90 e 93 km de altura é observada uma inversão no gradiente de temperatura, levando à formação de dois mínimos de temperatura.

A realização deste trabalho foi de grande importância pois marcou o início das medidas de temperatura na região da mesopausa com o radar de laser do INPE. O desenvolvimento do novo método experimental reuniu simplicidade e eficiência superando os obstáculos inerentes à área de pesquisa experimental e atingindo os objetivos propostos.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Batista, P. P.; Clemesha, B. R.; Simonich, D. M. and Kirchhoff, V. W. J. H. Tidal oscillations in the atmospheric sodium layer. *J. Geophys. Res.*, 90(D2):3881-3888, Apr. 1985.

Batista, P. P.; Clemesha, B. R.; Simonich, D. M. Seasonal variations in mesospheric tidal activity. *J. Geophys. Res.*, 95(D6):7435-7442, May 1990.

Batista, P. P.; Clemesha, B. R.; Simonich, D. M. Observations of atmospheric density and temperature between 35 e 70 km by Rayleigh lidar at São José dos Campos, SP. *Rev. Bras. Geof.*, 13(1):15-23, Mar. 1995.

Bills, R. E.; Gardner, C. S. and Franke, S. J. Na Doppler/temperature lidar: initial mesopause region observations and comparison with the Urbana medium frequency radar. *J. Geophys. Res.*, 96(D12):22701-22707, Dec. 1991.

Blamont, J. E.; Donahue, T. M.; Lory, M. L. Measurements of the temperature in the upper atmosphere to 150 km in a rocket experiment. *Phys. Rev. Lett.*, 6(8):403-404, Apr. 1961.

Blamont, J. E.; Chanin, M.-L.; Megie, G. Vertical distribution and temperature profile of the night time atmospheric sodium layer obtained by laser backscatter. *Ann. Geophysique*, 28(4):833-838, Oct.-Nov.-Dec. 1972.

Bricard, J.; Kastler, A. Recherches sur la radiation D du sodium dans la lumière du ciel crépusculaire et nocturne. *Ann. Geophysique*, 1(1):53-91, Août. 1944.

Chanin, M.-L. Structure Physique des raies de résonance émises par un nuage artificiel d'alcalins et mesure de la température de l'ionosphère. *Ann. Géophysique*, 21(3):303-346, Juil.-Sept. 1965.

Clemesha, B. R.; Rodrigues, S. N. The stratospheric scattering profile at 23°S. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 33(7):1119-1123, July 1971.

Clemesha, B. R.; Simonich, D. M. Stratospheric dust measurements 1970-1977. *J. Geophys. Res.*, 83(C5):2403-2408, May 1978.

Clemesha, B. R. Lidar studies of alkali metals. *Handbook of MAP*, 13:99-112, Nov. 1984.

Clemesha, B. R.; Simonich, D. M.; Takahashi, H.; Batista, P. P.; Sahai, Y. The annual variation of the height of the atmospheric sodium layer at 23°S: possible evidence for convective transport. *J. Geophys. Res.*, 97(D5):5981-5985, Apr. 1992.

Frick, K. H.; von Zahn, U. Mesopause temperatures derived from probing the hyperfine structure of the D<sub>2</sub> resonance line of sodium by lidar. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 47(5):499-512, May 1985.

Gibson, J. A.; Thomas, L.; Bhattacharyya, S. K. Laser observations of the ground-state hyperfine structure of sodium and of temperature in the upper atmosphere. *Nature*, 281(13):131-132, Sept. 1979.

Megie, G.; Chanin, M. L.; Tulinov, G. Y.; Doudoladov, Y. P. High latitude measurements of the atomic sodium concentration and neutral temperature at the mesopause level by the lidar technique. *Planet. Space Sci.*, 26:509-511, Jan. 1978.

Roble, R. G.; Dickinson, R. E. How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? *Geophys. Res. Lett.*, 16(12):1441-1444, Dec. 1989.

She, C. Y.; Latifi, H.; Yu, J. R.; Alvares II, R. J.; Bills, R. E.; Gardner, C. S. Two-frequency lidar technique for mesospheric Na temperature measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 17(7):929-932, June 1990.

She, C. Y.; Yu, J. R.; Latifi, H.; Bills, R. E. High-spectral-resolution fluorescence light detection and ranging for mesospheric sodium temperature measurements. *Appl. Opt.*, 31(12):2095-2106, Apr. 1992.

von Zahn, U.; Frick, K. H.; Gerndt, R.; Blix, T. Mesospheric temperatures and the OH layer height as derived from ground-based lidar and OH\* spectrometry. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 49(7/8):863-869, Jul./ Aug. 1987.