

Probing the Martian atmosphere with MAVEN/IUVS stellar occultations

MAVEN/IUVSの星掩蔽による火星大気調査

H. Groller, R. V. Yelle, T. T. Koskinen, F. Montmessin, G. Lacombe, N.
M. Schneider, J. Deighan, A. I. F. Stewart, S.K. Jain, M. S. Chaffin, M.
M. J. Crismani, A. Stiepen, F. Lefevre, W. E. McClintock, J. T. Clarke,
G. M. Holsclaw, P. R. Mahaffy, S. W. Bougher, and B. M. Jakosky

Geophys. Res. Lett., 42., doi: 10.1002/2015GL065294

東北大学 M1 高見康介

先行研究、意義

Previous study

UVのstellar occultationsは上層大気の構造や組成を研究する上で有効な技術である。

[Montmessin et al., 2006b, 2006a; Lebonnois et al., 2006; Forget et al., 2009; McDunn et al., 2010; Montmessin, 2013]

Stellar occultationsは、MAVENの目標である上層大気(~110-200 km)と下層大気(~45-110 km)の接続を議論するための重要な観測項目になっている。(→外気圏温度の決定機構→散逸量の議論)

Topic of this study

SPICAM/MEXの分解能が~1.5 nmに対してIUVSは分解能が~0.6 nmとかなり大きい。SPICAMには見れないスペクトル構造を捉える。

火星上層大気は大きな変動を示す。

したがって、この領域の物理を解明するには様々な条件での密度データが必要になる。

原理

Stellar occultation

衛星が近火点を進む時、火星の大気横切って抜けてくる星の放射を火星大気がどれほど吸収したかを観測する。

星の元のスペクトルと高度ごとの観測スペクトルを比較して、放射の吸収率に直す。
その高度にどれだけ吸収物質が存在するかが導出できる。

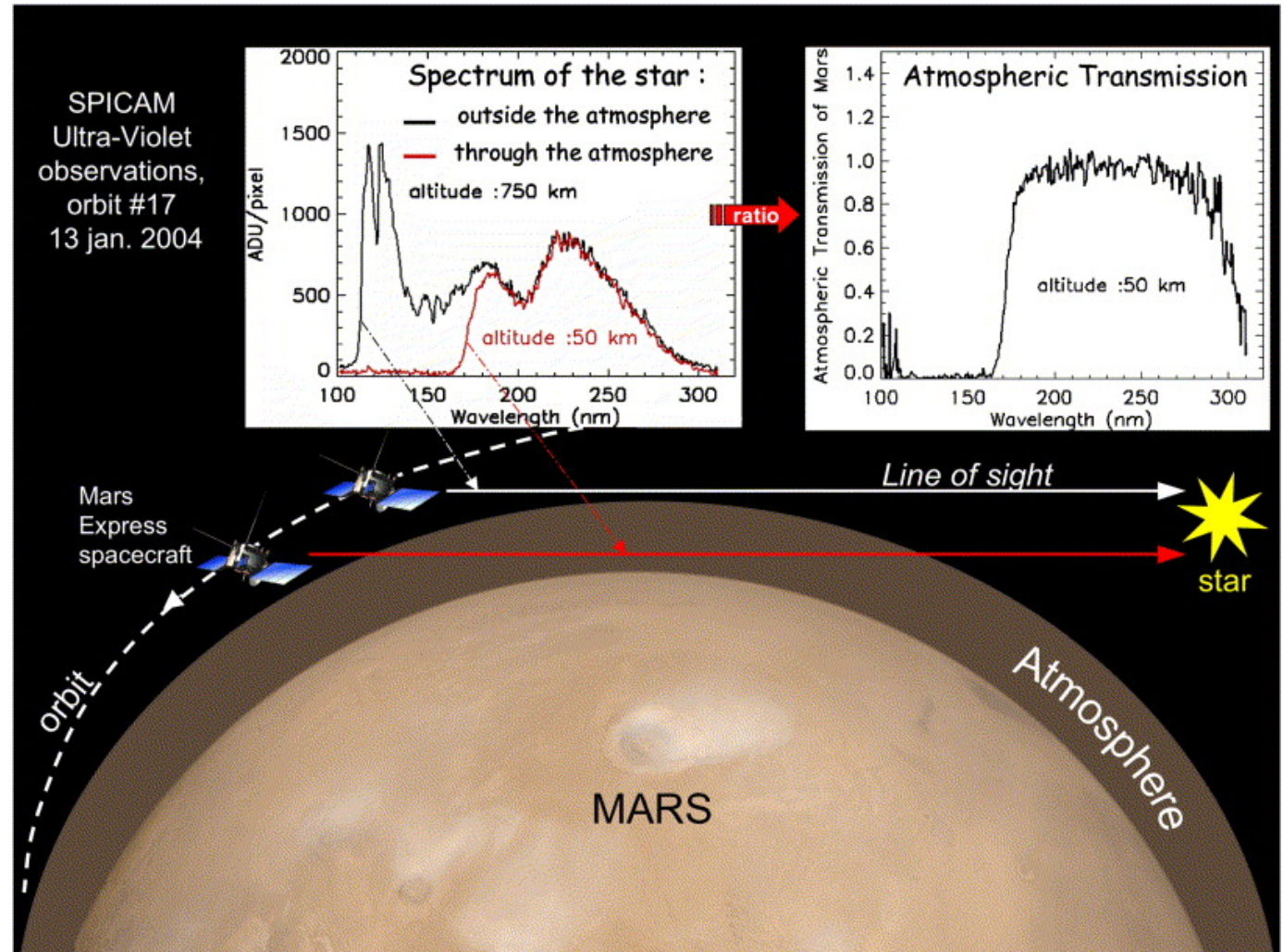


Figure1: MEX衛星のstellar occultationの原理

観測

観測機器 *Imaging UltraViolet Spectrograph (IUVS/MAVEN)*

波長	FUV channel	110-190 nm
波長分解能	0.33 nm	
観測高度	100-150 km	
高度分解能	1.5~4.5 km	
スリット	0.06°×11°	
積分時間	2 s	
S/N	~22(130 nm), ~6(165 nm)	

観測条件

$F_{10.7}$ 138 solar flux units
 観測点 赤道、中緯度/夜面
 13 occultations
 (10 occultations → 温度プロファイル)

Table 1. Observation Geometry for Occultations Recorded During the First Stellar Campaign^a

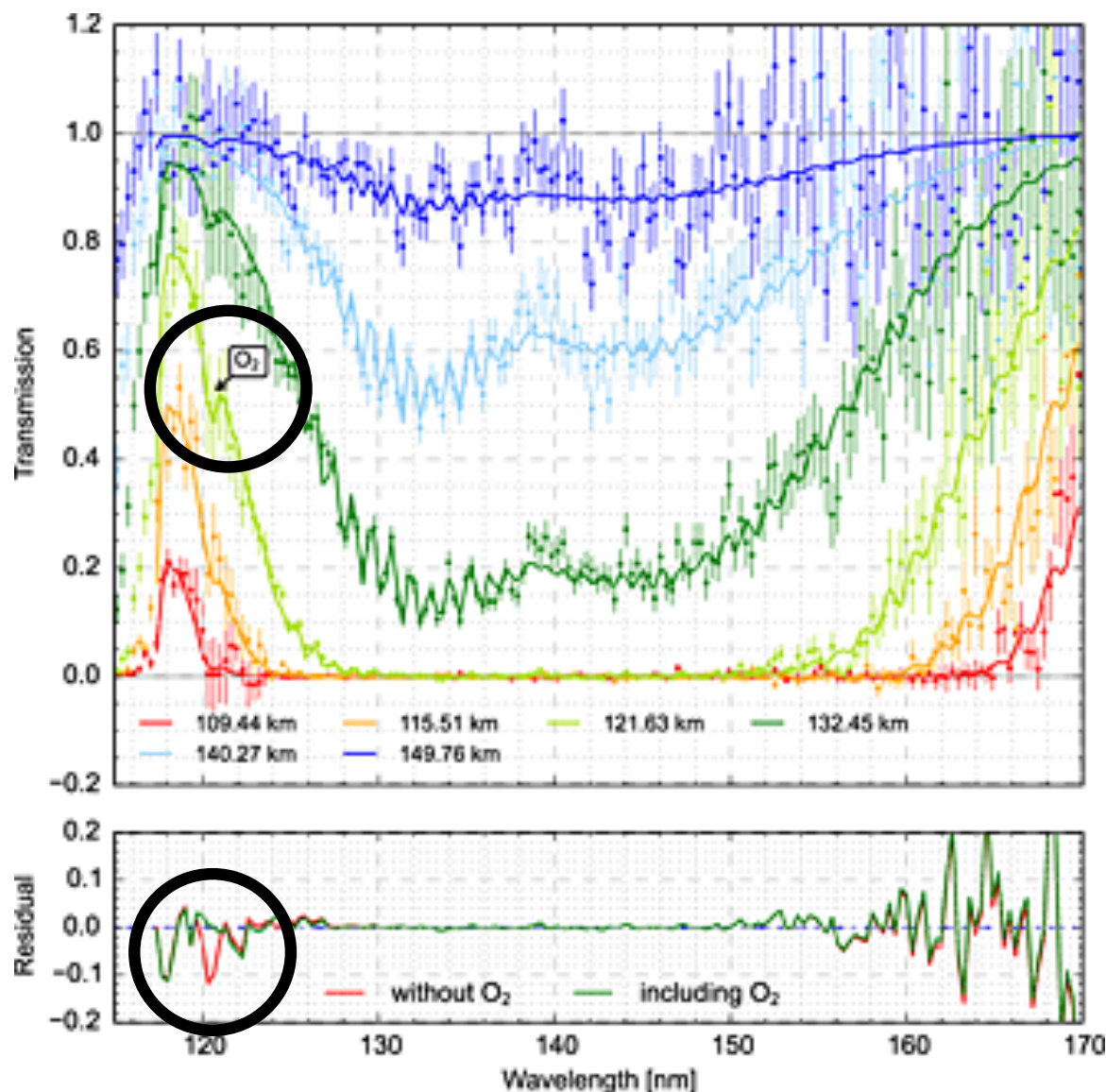
Star	Orbit (Event #)	Egress/Ingress	UTC Time	Lon [°]	Lat [°]	Ls [°]	SZA [°]	LT [hrs]
λ Sco	00935 (7)	Egress	24 Mar 2015 - 23:43:55.31	-131.71	-38.17	314.07	116.02	21.86
λ Sco	00937 (7)	Egress	25 Mar 2015 - 08:43:40.12	95.91	-36.92	314.28	116.81	21.81
λ Sco	00939 (7)	Egress	25 Mar 2015 - 17:45:16.44	-36.51	-35.28	314.50	117.85	21.76
λ Sco	00941 (7)	Egress	26 Mar 2015 - 02:46:50.76	-168.89	-34.02	314.72	118.63	21.72
λ Sco	00943 (7)	Egress	26 Mar 2015 - 11:48:22.84	58.72	-32.43	314.93	119.59	21.68
α Lyr	00935 (9)	Ingress	25 Mar 2015 - 01:01:56.78	-30.65	8.06	314.10	94.19	5.86
α Lyr	00937 (9)	Ingress	25 Mar 2015 - 10:03:37.09	-163.40	8.45	314.31	95.19	5.80
α Lyr	00939 (9)	Ingress	25 Mar 2015 - 19:05:13.41	63.80	8.88	314.53	96.27	5.73
α Lyr	00941 (9)	Ingress	26 Mar 2015 - 04:06:47.73	-69.07	9.33	314.75	97.41	5.66
α Lyr	00943 (9)	Ingress	26 Mar 2015 - 13:08:19.81	158.12	9.74	314.96	98.47	5.59
β Cep	00935 (10)	Ingress	25 Mar 2015 - 01:38:41.51	-34.60	-17.44	314.11	81.93	6.19
β Cep	00937 (10)	Ingress	25 Mar 2015 - 10:40:22.08	-166.87	-17.45	314.33	82.34	6.16
β Cep	00939 (10)	Ingress	25 Mar 2015 - 19:41:58.40	60.77	-17.46	314.55	82.84	6.13

^aThe given times and geophysical parameters are given for the beginning of the occultations. The used stars are Beta Cephei (β Cep), Lambda Scorpii (λ Sco), and Alpha Lyrae (α Lyr).

解析

- 1, バックグラウンドを吸収スペクトルから引く
- 2, Levenberg-Marquardtでfitting（最小二乗法）
- 3, 吸収のfittingからcolumn densityを導出 (Appendix)
- 4, Tikhonov regularization methodを用いて
密度プロファイルを導出
- 5, CO₂ algorithm [Snowden et al.,2013]によって、
温度プロファイルを導出
(静水圧平衡 & algorithm & 理想気体の状態方程式)

結果



2, Levenberg-Marquardtでfitting
(最小二乗法)

下図はモデルと計測の差で
 O_2 あり(緑)と O_2 なし(赤)の変
化を見ている。
(121.63 kmの吸収スペク
トル)

120.6nmのところに注目すると
 O_2 なしだけ差が大きくなって
いる。ここで酸素の吸収があ
ることがわかる

Figure2: 高度ごとの吸収スペクトル

結果

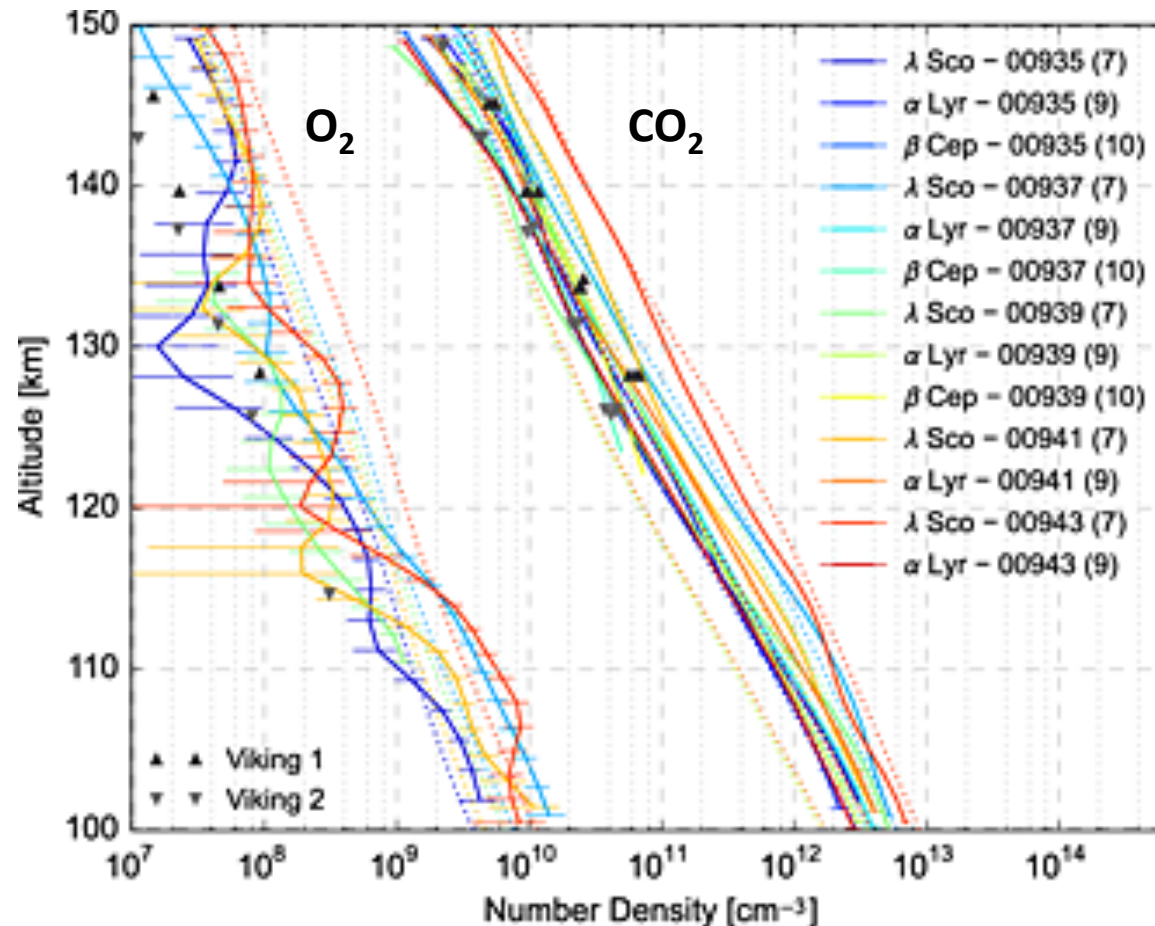


Figure3: 密度鉛直プロファイル

3, 吸収のfittingから column densityを導出

点線は、Mars Climate Database (MCD) using Laboratoire de Meteorologie Dynamique – General Circulation Model (LMD-GCM) [Gonzalez-Galindo et al., 2009]

観測と近いところを使う

F_{10.7}: 140-150 (観測 138)

Ls: 300 - 330° (観測 ~314°)

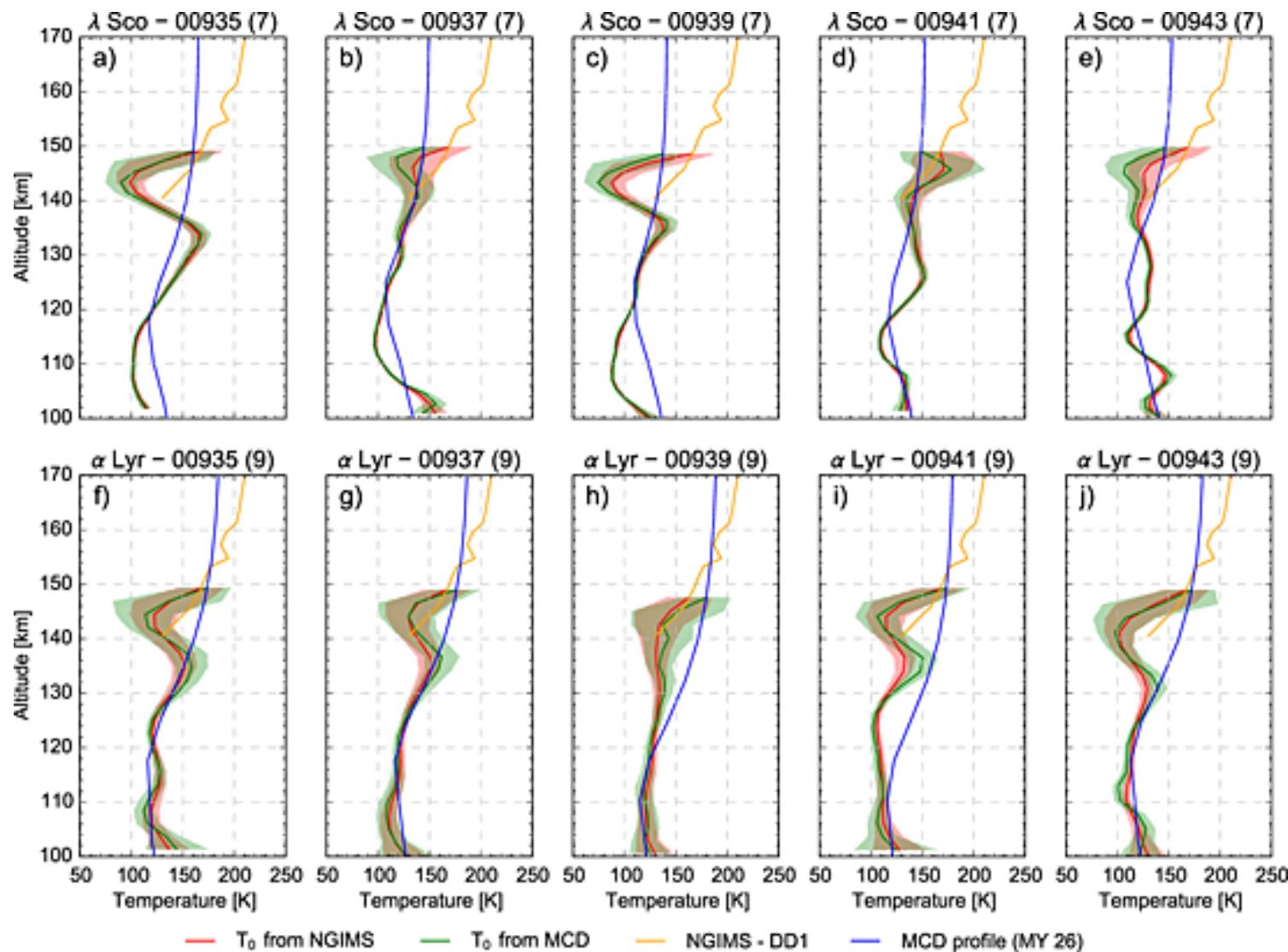
Viking [Nier and McElroy et al., 1977]

や

SPICAM/MEX [Sandel et al., 2015]

と一致

結果



5, CO₂ algorithm
[Snowden et al., 2013]によ
って、温度プ
ロファイルを
導出

上層境界(150
km)として利用
MCD(青)
NGIMS (黄)
[Mahaffy et al.,
2015]
高度: >125 km
太陽天頂角: 110°

Figure4: 温度プロファイル

結果

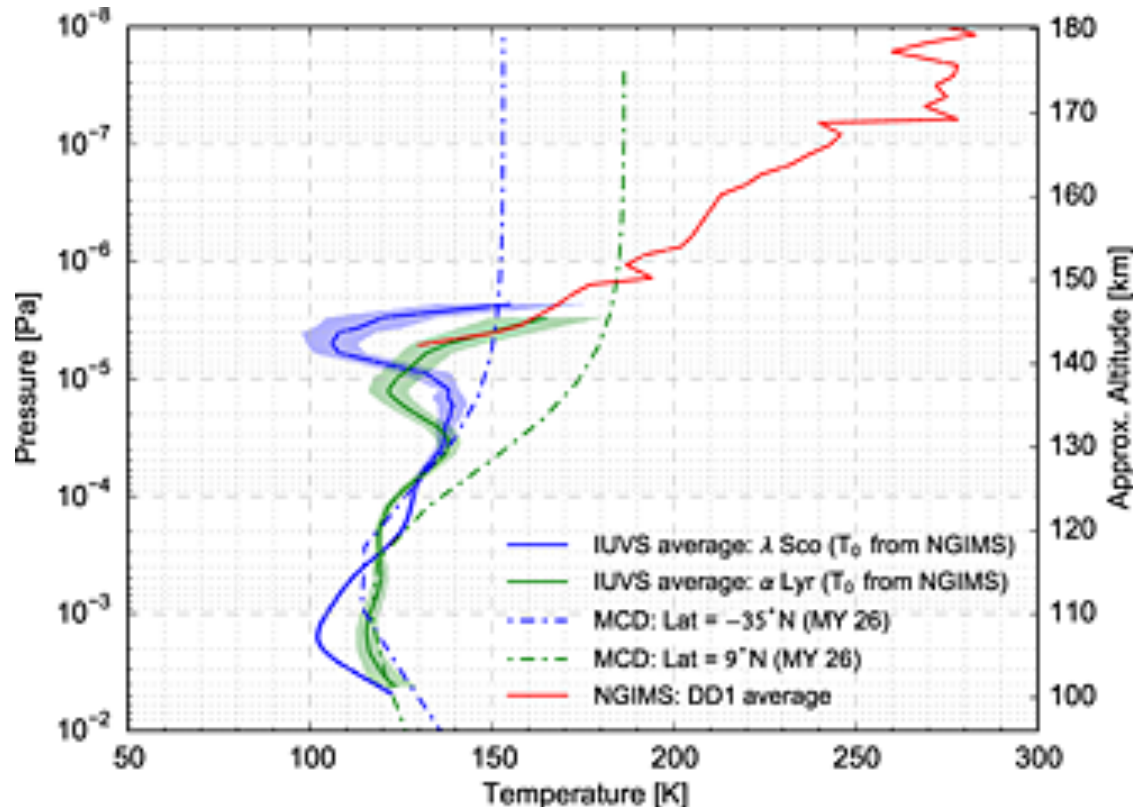


Figure5: 平均温度プロファイル

[McDunn et al., 2010]で 10^{-4} Paまで一致
上昇し始めるのがMCDに比べて低気圧

形は[Keating et al., 2008] (accelerometer measurements/MRO) に似ているが大きさは上図の方が大きい

Figure4を等圧力で平均

上層境界(150 km)として利用

NGIMS [Mahaffy et al., 2015] (赤線)

高度: >125 km

太陽天頂角: 110°

Ls: 289

緯度: 46°N

MCDプロファイル (青、緑点線)

(NGIMSとほぼ同じなのでグラフは省略)

下層の極小(~ 110 km)がモデルより低高度

モデルは ~ 120 kmから上昇していくが、観測値は α Lyr で ~ 135 km、 λ Scoで ~ 140 kmで再び極小となる。

結論、議論

熱圏下層で温度勾配に著しい変動が確認できた。

温度モデルとの不一致はモデルのエネルギーバランスが火星熱圏をよく表せていないことを示す。

限られた観測(夜面のみ)では不一致の原因を指摘するのは難しい。

[原因: モデル]

この領域の温度は昼面から夜面への熱輸送によって維持されるので、モデルにおいて昼夜間対流を大きく見積もっていた？

or

モデルよりも放射冷却効率が大きく、熱圏下層が予測よりも冷やされる？

[原因: 実際の火星]

夜面の低温は昼面と夜面の温度差が大きいことを意味する？
(強い圧力勾配が上層大気の循環を変化させる)

or

昼面の熱圏下層が予測を超えて冷えている？

観測した温度は火星大気で長期間安定して確認される特徴なのかどうか？

Appendix

不明点

- The FUV channel of the IUVS covers the 110 to 190 nm spectral range with an intrinsic spectral resolution of 0.6 nm [McClintock *et al.*, 2014]; however, to reduce the data volume, four spectral pixels are binned to produce an effective sampling of 0.33 nm.

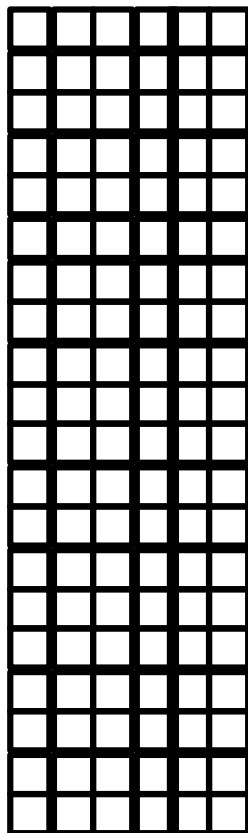
バックグラウンド

“keyhole” $0.69^\circ \times 0.90^\circ$

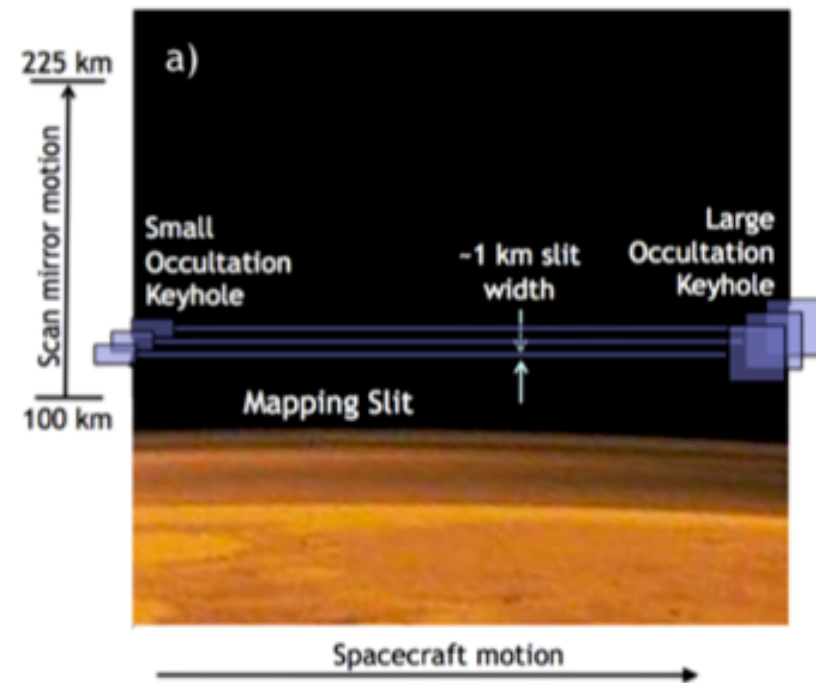
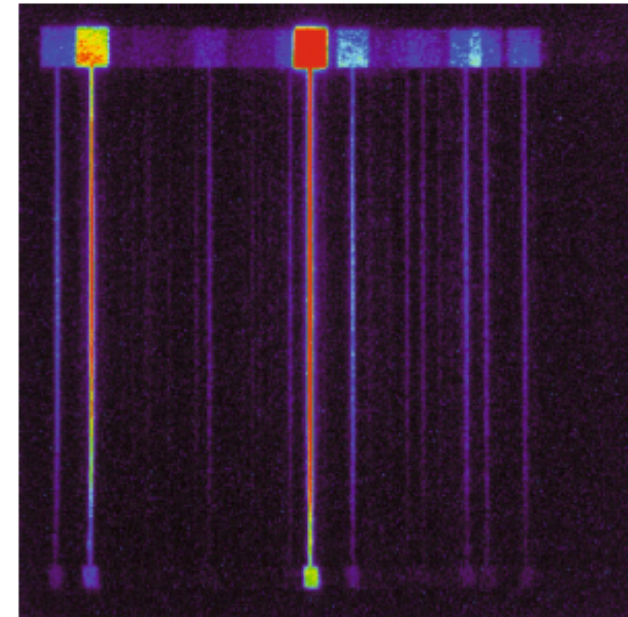
H Lyman α (121.6 nm)

6 pixels

20
lines



機器性能
背景レベル
迷光
火星からの放射
熱雑音
を左から導出



Column density

■ 吸収線(吸収係数で表現)

放射: $I(\nu) = I_0(\nu) \exp\{-\tau(\nu)\}$ (3.1)

光学的厚さ: $\tau(\nu) = \int_0^u k_\nu \rho du'$

吸収係数: $k_\nu = S f(\nu - \nu_0)$

■ 密度リトリバル

式(3.1)について大気をN個の層に分け各層での吸収の和として表す

$$\tau(\nu_j) = \sum_{i=1}^N k_i(\nu_j) q(z_i) \delta u_i$$

ここでは簡単のため、データ数を一つまで減らして密度の全量を導出する。

数密度を $q = \alpha q_0$ とすると、

$$\tau(\nu_j) = \sum_{i=1}^N k_i(\nu_j) \alpha q_0(z_i) \delta u_i = \alpha \tau_0(\nu_j)$$

式(3.1)から大気上端の光学的厚さは求められるので、 $R(\alpha) = \sum_{j=1}^M \{\alpha \tau_0(\nu_j) - \tau(\nu_j)\}^2$

求められた α を式に代入すればcolumn densityが得られる。

I: 吸収後の放射強度

I_0 : 吸収前の放射強度

τ : 光学的厚さ

u, u' : 光路

k_ν : 吸収係数(吸収の形)

S: 線強度

$f(\nu)$: 形状因子

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\nu) d\nu = 1$$

Snowden et al., 2013

CO₂ 密度 → 温度プロファイル

静水圧平衡 $P(r) = P_0 + GMm \int_r^{r_0} N(r) \frac{dr}{r^2}$

$$P_j = P(r_j) = P_0 + \frac{GMm}{r_0} \sum_{i=1}^{j-1} N_{i+\frac{1}{2}} (\chi_{i+1} - \chi_i)$$
$$\chi = \frac{r_0}{r} - 1$$

理想気体の状態方程式 $T_j = P_j / k N_j$

吸収断面積

CO₂ (106-192 nm)

[Stark et al., 2007, Yoshino et al., 1996, and Parkinson et al., 2003]

O₂

[Ogawa and Ogawa, 1975, Lu et al., 2010, Yoshino., 2005, and Minschwaner et al., 1992]

130 Kの吸収断面積(温度依存はあまりない[Sandel et al., 2015])