Soret, L., Hubert, B., Gérard, J.-C., Jain, S., Chirakkil, K., Lillis, R., & Deighan, J. (2024). Quantifying the electron energy of Mars aurorae through the oxygen emission brightness ratio at 130.4 and 135.6 nm. Journal of Geophysical Research: Planets, 129, e2023JE008214. https://doi.org/10.1029/2023JE008214

原田裕己



JGR Planets

RESEARCH ARTICLE

10.1029/2023JE008214

Key Points:

- The 130.4 optically thick and the 135.6 nm optically thin oxygen emissions can be observed during a Mars auroral event
- Radiative transfer effects increase the observed nadir brightness of the 130.4nm emission
- Brightnesses of both emissions depends on O density, initial electron energy and flux, while their ratio depends on the electron energy

Correspondence to:

L. Soret, lauriane.soret@uliege.be

Citation:

Soret, L., Hubert, B., Gérard, J.-C., Jain, S., Chirakkil, K., Lillis, R., & Deighan, J. (2024). Quantifying the electron energy of Mars aurorae through the oxygen emission brightness ratio at 130.4 and 135.6 nm. *Journal of Geophysical Research: Planets*,

Quantifying the Electron Energy of Mars Aurorae Through the Oxygen Emission Brightness Ratio at 130.4 and 135.6 nm

Lauriane Soret¹, Benoît Hubert¹, Jean-Claude Gérard¹, Sonal Jain², K. Chirakkil^{2,3}, R. Lillis⁴, and J. Deighan²

¹LPAP, STAR Institute, Université de Liège, Liège, Belgium, ²LASP, University of Colorado, Boulder, CO, USA, ³Space and Planetary Science Center, Khalifa University, Abu Dhabi, UAE, ⁴UC Berkeley, Berkeley, CA, USA

Abstract Mars discrete aurorae are caused by accelerated electrons precipitating into the atmosphere and interacting with species such as atomic oxygen. However, the energy of the electrons causing these aurorae remains currently unclear: no simultaneous and concurrent measurements of electron analyzers and spectrometers have been performed so far, preventing from assessing the exact energy of the downgoing auroral electrons. Several auroral emissions have been observed so far on Mars, among which are two oxygen emissions in the far ultraviolet at 130.4 and 135.6 nm. In this study, we simulate the vertical distribution of these auroral oxygen emissions with an electron transport calculation coupled with a radiative transfer model to account for the optical thickness of the atmosphere for the 130.4-nm triplet. We show that the brightness ratio of these oxygen emissions is independent of the downward electron energy flux and only slightly depends on the atomic oxygen atmospheric composition. In contrast, the brightness ratio is strongly related to the initial energy of the auroral electrons. Measuring the brightness ratio is therefore a unique tool to remotely estimate the energy of the electrons causing the Mars discrete aurorae. We compare our model results with observations from the Emirates Mars Ultraviolet Spectrometer on board the Emirates Mars Mission and find that electrons with typical energies of 250–300 eV are compatible with the observed ratio of 5.

- 火星のディスクリートオーロラは大気への電子降り込み によって引き起こされる。
- オーロラ発光と超熱的電子の同時観測がないため(#最近見つけました: Harada et al. (2024))、火星オーロラを引き起こす降下電子の正確なエネルギーが不明である。
- ・ 火星FUVオーロラの2つの酸素輝線(130.4 nmと135.6 nm)に着目し、光化学・電子輸送・放射輸送を結合させたモデルを用いて、発光高度分布を計算する。130.4 nmは火星熱圏では光学的に厚いため、多重散乱を考慮に入れて放射輸送を解く必要がある。
- 2つの輝線の輝度比は、電子フラックスに依存せず、大気組成には少ししか依存しない一方で、オーロラ電子のエネルギーに強く依存する。輝度比は降下電子のエネルギーを遠隔的に推定する手段として使える。
- EMMが観測した130.4 nm/135.6 nm輝線輝度比~5には、典型的には250-300 eV程度の電子が対応する。

火星ディスクリートオーロラ:UVスペクトル

CO Cameron band: 180–240 nm

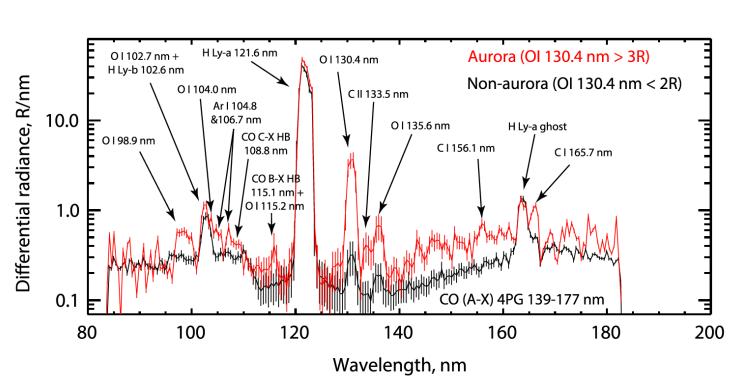
• CO fourth positive group: 145–170 nm

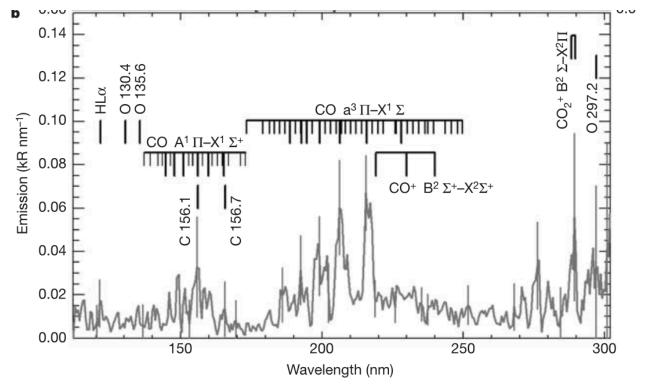
• CO₂+ UV doublet: 289 nm

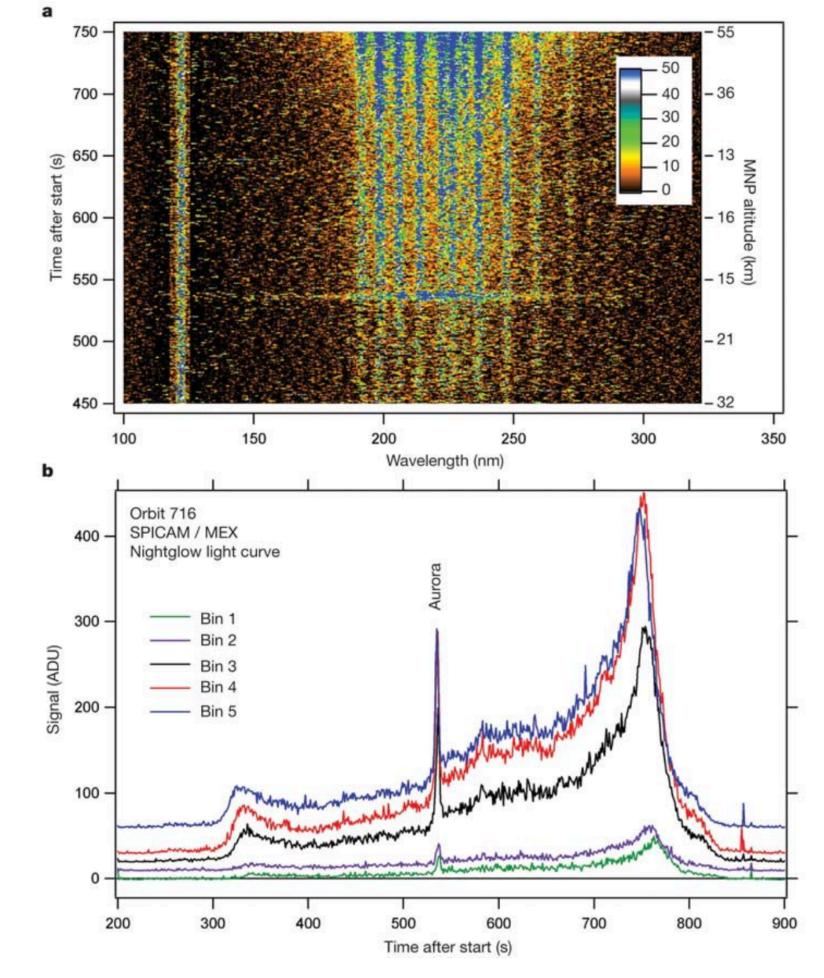
• O: 130.4 nm, 135.6 nm

• この2つの原子状酸素輝線は発光断面積の電子エネルギー依存性が大きく異なるため、 原理的には輝線輝度比はオーロラ電子のエネルギー分布を反映する。

• ただし、火星大気からの130.4 nmオーロラ発光は光学的に厚いため、多重散乱の効果を 考慮する必要がある。





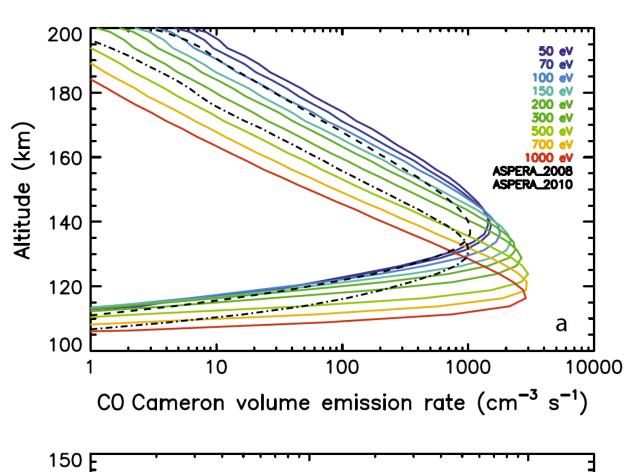


From Fig. 4 of Lillis et al. (2022).

From Figs. 1 & 3 of Bertaux et al. (2005).

火星ディスクリートオーロラ:電子エネルギー

- 火星ディスクリートオーロラ観測と超熱的電子のその場観測を直接的に結びつけようとする試みは、これまで功を奏していない(Leblanc et al., 2008; Gérard et al.; Soret et al., 2021)。
 - 多くの観測事例において、観測しているオーロラ発光の場所と電子が降り込む場所(探査機を貫く磁力線の足元)が一致しないためであると解釈される。
 - # なお、両者の間には統計的には共通の特性が見出されている(Xu et al., 2022)。
- Gérard et al. (2015)とSoret et al. (2016, 2021)は、direct simulation Monte Carlo (DSMC)電子輸送モデルを用いて、火星ディスクリートオーロラ発光の高度分布を計算した。観測された発光強度のピーク高度(110–145 km)から、オーロラ電子のエネルギーは50–1000 eV程度であると推定される。
- 本研究では、FUV酸素輝線を用いた新たな火星オーロラ電子のエネルギー推定手法を開発する。



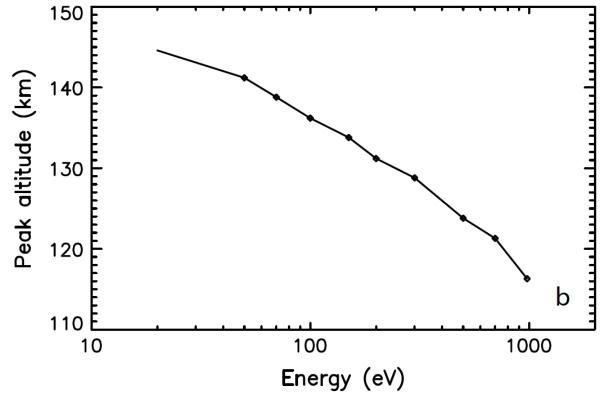


Fig. 5. (a) Monte Carlo auroral model simulations of the CO Cameron volume emission rate for different initial electron energy spectra. The solid colored lines correspond to mono-energetic fluxes as input parameters of the model while the dashed lines correspond to ASPERA-3/ELS electron energy spectra. (b) The peak altitude decreases with increasing initial energies.

From Fig. 5 of Soret et al. (2016).

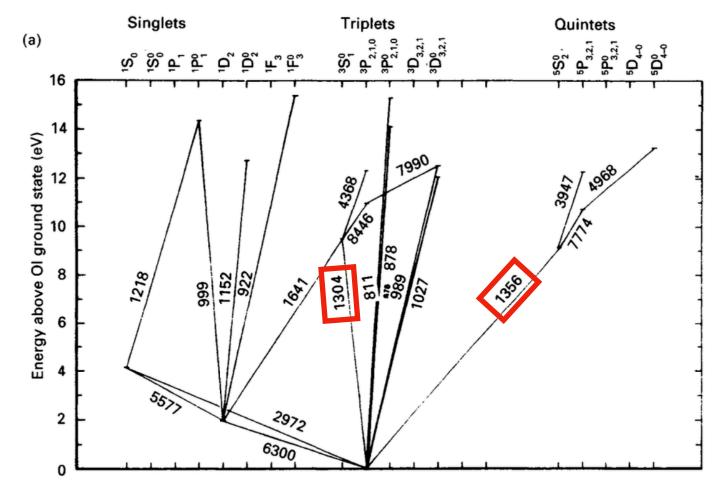
FUV発光モデル

- Ol 130.4 nm発光の電子衝突励起過程:
- OI 135.6 nm発光の電子衝突励起過程:

$$e(E>9.5 \text{ eV}) + O(^{3}\text{P}) \rightarrow e + O(^{3}\text{S}^{0})$$

$$e(E>15.0 \text{ eV}) + \text{CO}_2 \rightarrow e + \text{CO} + \text{O}(^3\text{S}^0)$$

$$e (E > 20.9 \text{ eV}) + \text{CO} \rightarrow e + C + O(^{3}\text{S}^{0})$$



From Fig. 6.17a of Hargreaves (1992).

(1)
$$e(E>9.1 \text{ eV}) + O(^3P) \rightarrow e + O(^5S^0)$$
 (4)

(2)
$$e(E>14.6 \text{ eV}) + \text{CO}_2 \rightarrow e + \text{CO} + \text{O}(^5\text{S}^0)$$
 (5)

(3)
$$e(E>20.5 \text{ eV}) + \text{CO} \rightarrow e + C + O(^{5}\text{S}^{0})$$
 (6)

これらの輝線のオーロラ発光のシミュレーションには、下記のモデル・情報が必要。

- (2.2) 大気密度(O, CO, CO2) を提供する大気モデル
- (2.3) 電子の大気中の輸送と衝突を解くモデル
- (2.4) 各励起状態についての、電子エネルギー依存性を含む発光断面積
- (2.5) 光学的に厚い130.4 nm発光の計測輝度を予測するための放射輸送モデル

(2.2) 大気モデル、(2.3) 電子輸送モデル

- O, CO, CO₂密度の高度分布はMCD v6.1を用いる:
 - 平均的な太陽条件、Ls = 90°
 - 0 LT、経度180°、緯度50°S (真夜中の強い磁気異常に相当)
- 電子輸送は先行研究でも用いられているDSMCモデルを用いて解く(Soret et al., 2016, 2021; Shematovich et al., 1994, 2008;
 Gérard et al., 2008)。
 - 単一エネルギー(20–1000 eVの間で振る)・固定エネルギーフラックス(1 mW m-2)の降下電子を等方的・下向きに入射し、50–300 kmの高度範囲で大気との衝突を含めて電子の運動を解く。
 - 二次電子生成を含む。
 - 地殻磁場の効果は含まない。 #本文に誤記?

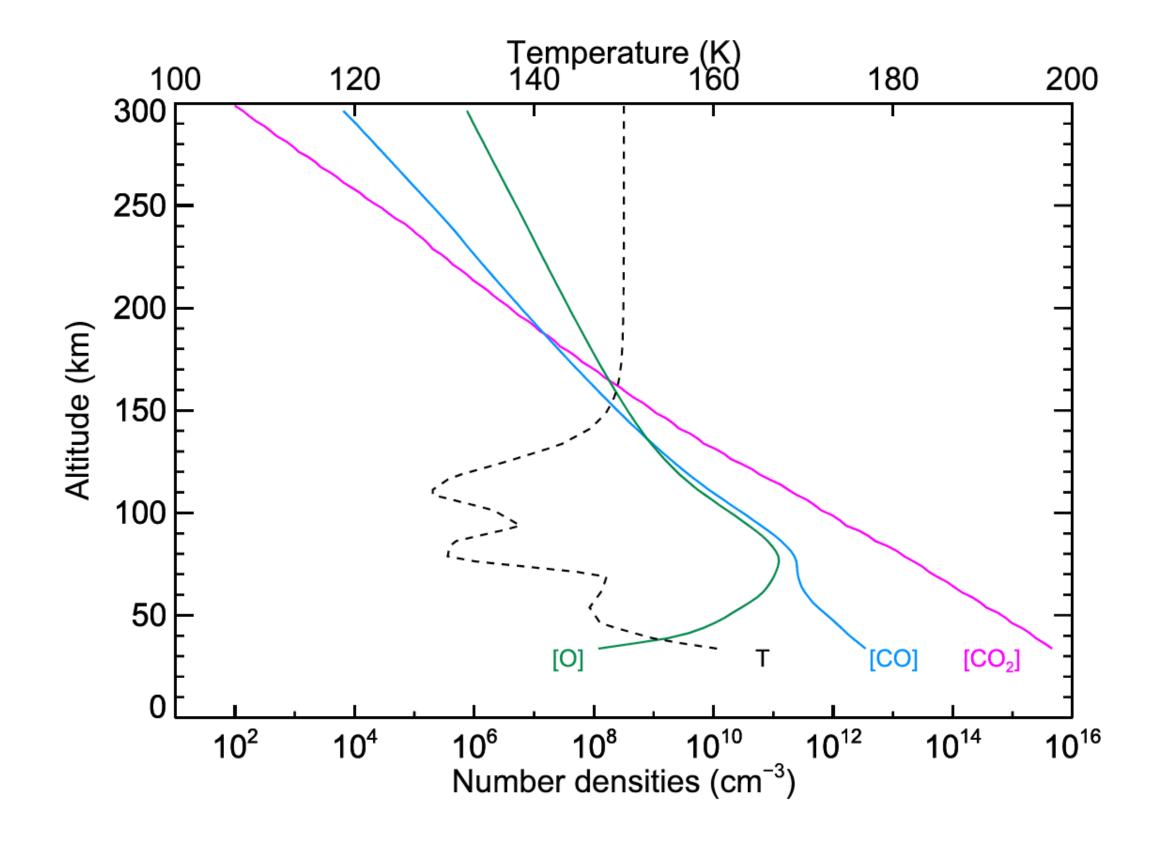


Figure 1. Temperature (black) and CO_2 (magenta), CO (blue) and O (green) density profiles at 00:00 LT, latitude 50°S, longitude 180° and $L_s = 90^\circ$ (MCD v6.1).

(2.4) 発光断面積

- ・ 過程(1): **Fig. 2黒線**の、Johnson et al. (2003)の光学的に薄い条件下の室内実験値を用いる。ただし、<u>光学的に厚い条件下では</u>、大気中での光子の捕捉効果(例: 99.0 nm線光子の再吸収→799.0 nm, 844.6 nm線経由のカスケード (Julienne and Davis, 1976))により、<u>実効的な断面積は大きくなる</u>と指摘されている(20 eVで1.45倍 (Meier, 1991))。後で議論。
- 過程(2): Mumma et al. (1972)の計測値をItikawa (2002)の提案に従って0.61倍して使用。 最大6.1x10⁻¹⁹ cm²。これはAjello et al. (2019)による最新の計測とよく一致する。
- 過程(3):Ajello (1971a)の計測結果とAjello et al. (2019)の再推定値を使用。最大8.8x10⁻¹⁹ cm²。
- 過程(4): Fig. 2青線の、Zipf and Erdman (1985)の値を用いる。
- 過程(5):Ajello (1971b)の計測値の形状を、Ajello et al. (2019)の最近の計測値にスケールして用いる。最大1.8x10⁻¹⁹ cm²。
- 過程(6): #本文に記載なし。参考文献から推察するにAjello (1971a)とAjello et al. (2019)か?

130.4 nm

$$e(E>9.5 \text{ eV}) + O(^{3}P) \rightarrow e + O(^{3}S^{0})$$
 (1)

$$e(E>15.0 \text{ eV}) + \text{CO}_2 \rightarrow e + \text{CO} + \text{O}(^3\text{S}^0)$$
 (2)

$$e(E>20.9 \text{ eV}) + \text{CO} \rightarrow e + C + O(^{3}\text{S}^{0})$$
 (3)

135.6 nm

$$e(E>9.1 \text{ eV}) + O(^{3}P) \rightarrow e + O(^{5}S^{0})$$
 (4)

$$e (E>14.6 \text{ eV}) + \text{CO}_2 \rightarrow e + \text{CO} + \text{O}(^5\text{S}^0)$$
 (5)

$$e (E > 20.5 \text{ eV}) + \text{CO} \rightarrow e + C + O(^{5}\text{S}^{0})$$
 (6)

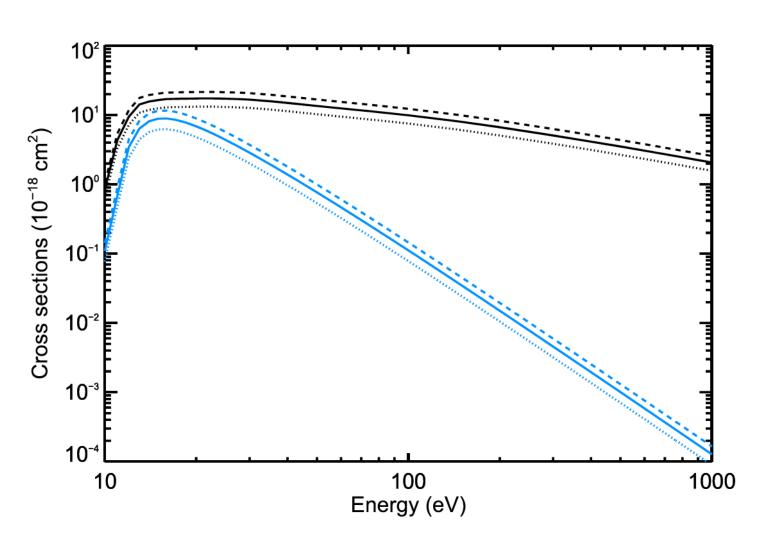


Figure 2. 130.4 (process 1, black) and 135.6-nm (process 4, blue) emission cross sections for electron impact on atomic oxygen. The dashed lines represent the upper limit uncertainty of the cross section values, while the dotted line represents the lower limit.

電子衝突過程の比較

- Fig. 3: 入射電子エネルギー別の、各過程のvolume emission rate (VER) への寄与。
- ・ # (2.2)大気密度高度分布と(2.4)電子衝突断面積を用いた(2.3)電子輸送モデルで計算した結果のデモ
- 130.4 nm, 135.6 nmの両方と
 も、原子状酸素への電子衝突の
 寄与(緑線)が支配的となる。

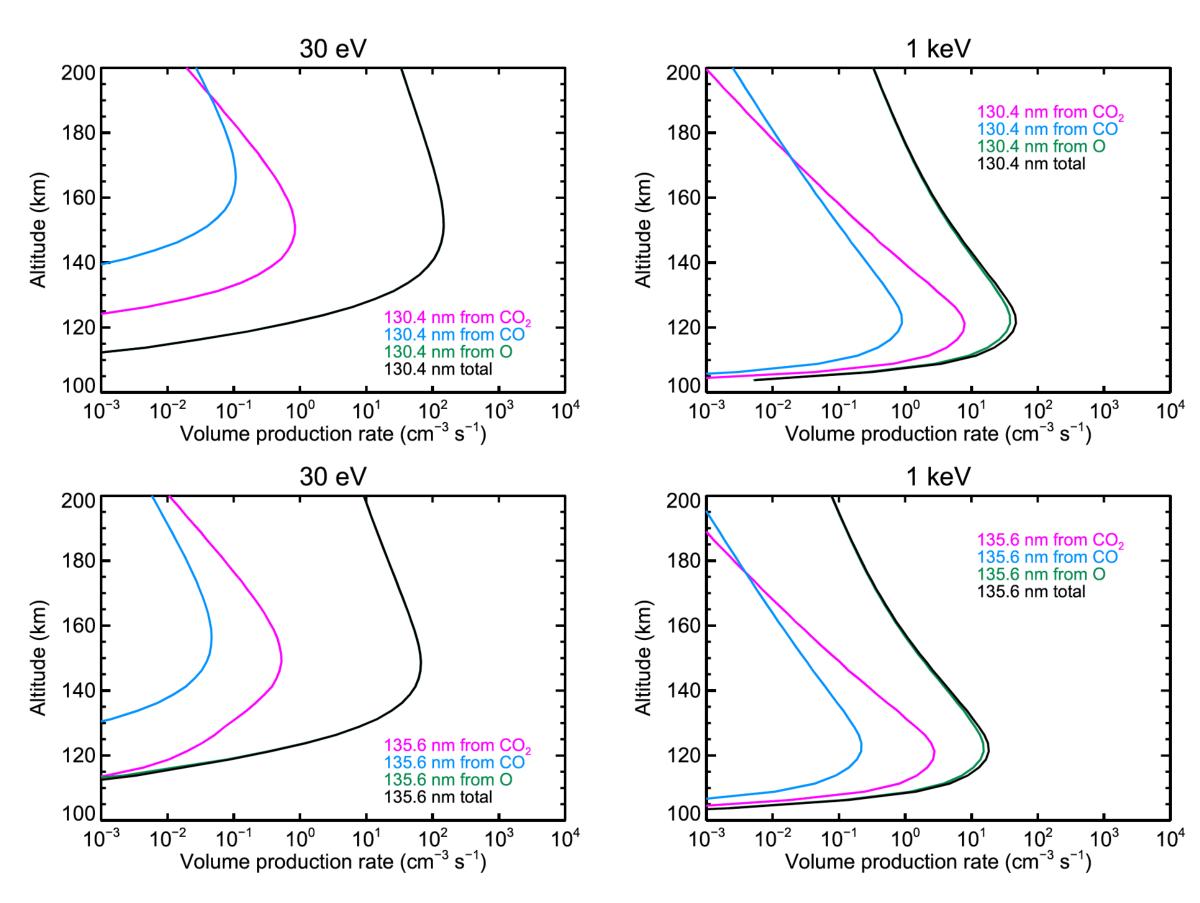


Figure 3. Contributions to the volume emission rate of the 130.4 (top) and 135.6-nm (bottom) oxygen auroral emissions. The main source is electron impact on atomic oxygen (green lines) over a wide range of initial energy of the electrons (left: 30 eV, right: 1 keV). At 30 eV, the green and black lines closely overlap.

(2.5) 放射輸送モデル

- 火星熱圏では130.4 nm線は光学的に厚い(高度224 kmで光学的厚さ1: Fig. 4) ため、放射輸送モデルで多重散乱を考慮してVERを計測輝度に変換する必要がある。
- 下方に放射された光子の後方散乱により、上方への放射が増強される。そのため、周回機観測の天底輝度が単なるVERの高度積分より増える。
- 130.4 nm輝線は、散乱の際に輝線の脇の方(光学的に薄い)に周波数再分配されることで、大気から脱出することができる。周波数再分配を含めて計算するREDISTERコード(Gladstone, 1985)を用いて、130.4 nm放射の多重散乱を考慮する。
- CO₂による吸収は高度91 km程度以下で効く(Fig. 4の水平破線)。 これは典型的な火星ディスクリートオーロラのピーク高度よりは十分 に下である。
- 135.6 nm線は光学的に薄い(光学的厚み < 0.01)ので、放射輸送計算は不要である。

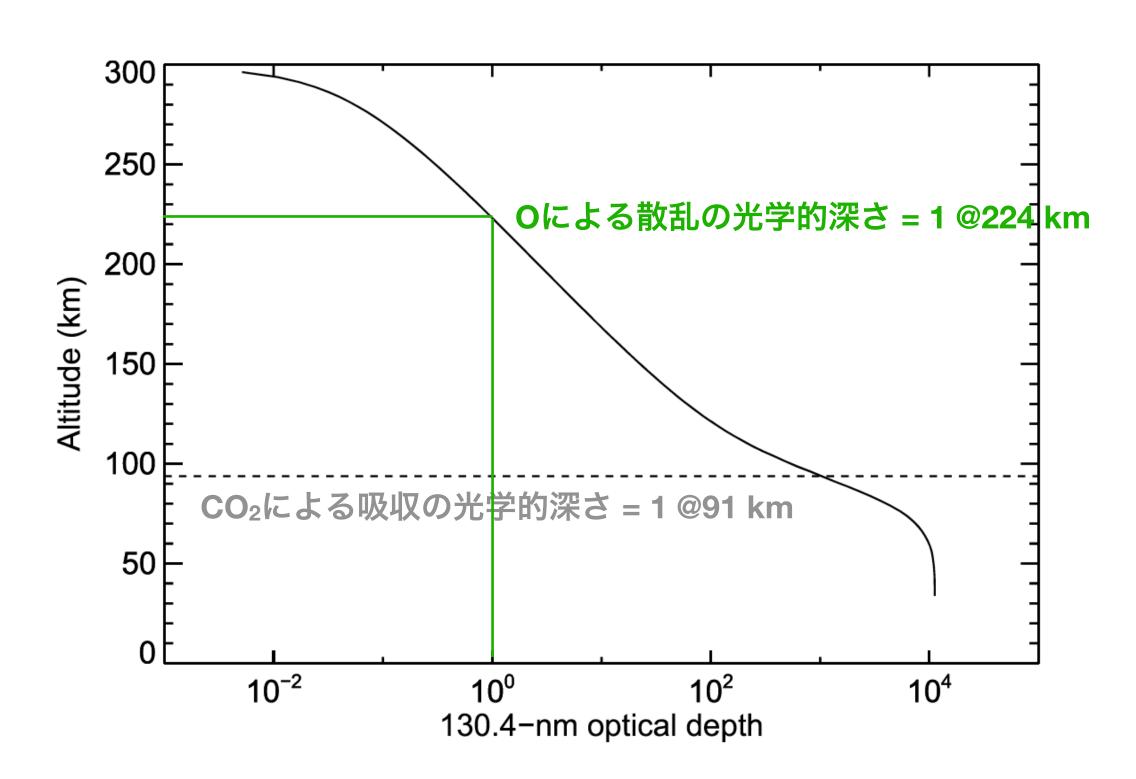


Figure 4. The O ${}^3S^0 - {}^3P$ triplet emission at 130.4 nm is optically thick in the Martian thermosphere. The calculated optical thickness at the center of the 130.49 nm line is shown for the atmospheric conditions illustrated in Figure 1. The horizontal dashed line corresponds to the altitude of unit optical depth for absorption by CO_2 at 130.4-nm.

シミュレーション結果:VERとリム輝度

- Figs. 5a & 5b: VER高度分布
 - より高いエネルギーの電子は、より低高度での発光に寄与する。
- Figs. 5c & 5d: 遠方からのリム観測を 模してVERを視線積分した高度分布 (この時点では放射輸送効果は含ま ない)
 - リム輝度は130.4 nmで3-19 kR、
 135.6 nmで1-10 kR程度となる。

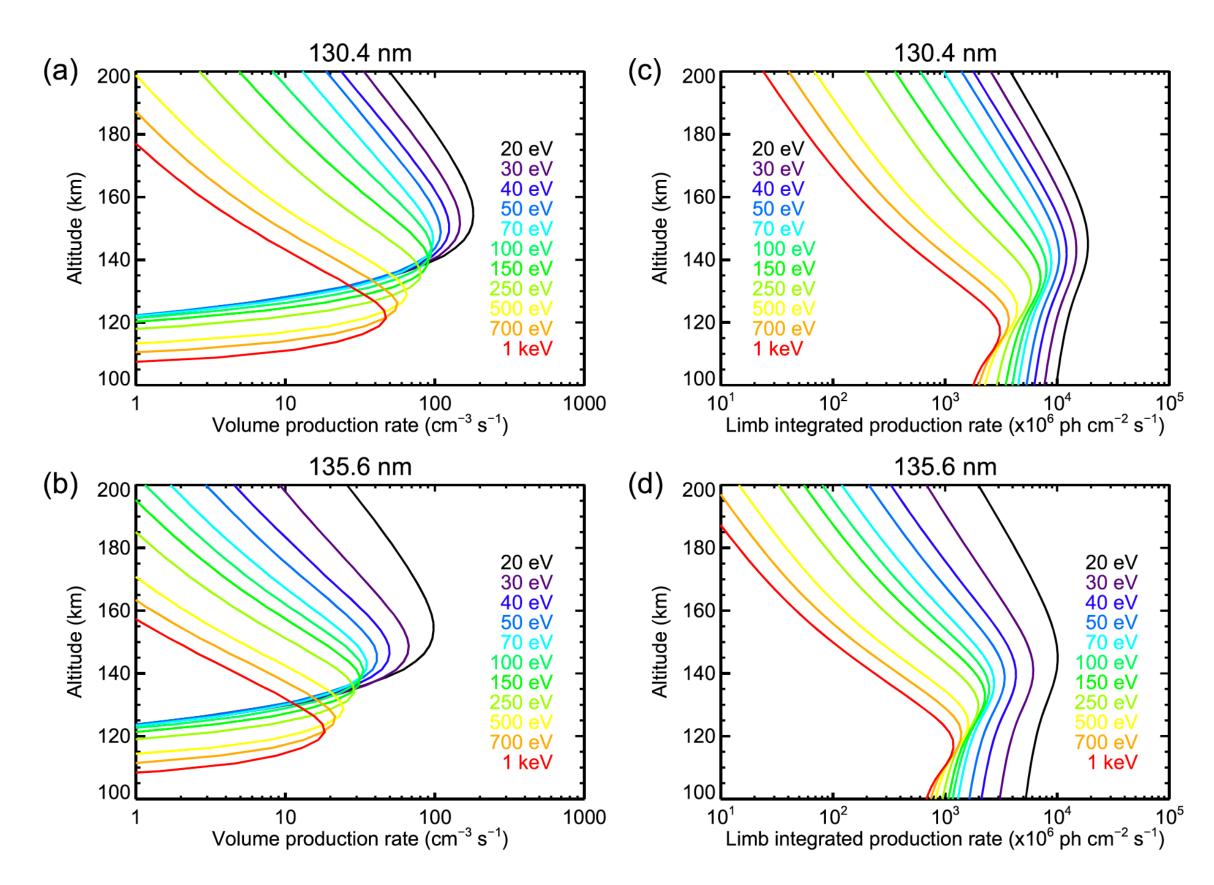


Figure 5. Volume production rates of the 130.4 nm (a) and 135.6 nm (b) oxygen emissions for initial electron energies ranging from 20 eV to 1 keV. Simulated limb integrated production rates of the 130.4 nm (c) and 135.6 nm (d) oxygen emissions for initial electron energies ranging from 20 eV to 1 keV, without considering absorption by CO₂ or radiative transfer effects. The downward electron energy flux is 1 mW m⁻² for all simulations.

シミュレーション結果:天底輝度

- Fig. 6a:
 - 水色線、灰色線:VERの高度積分から天底輝度を計算。
 - 黒線: 130.4 nmについて、高度600 kmの観測者を想定して放射輸送効果とCO₂による吸収を考慮した結果。灰色線と比べて、放射輸送効果により天底輝度が増大。
- Fig. 7: 放射輸送効果を含めた計測輝度の天頂角依存性。天頂角>120°でほぼ一定。光学的に厚いため。

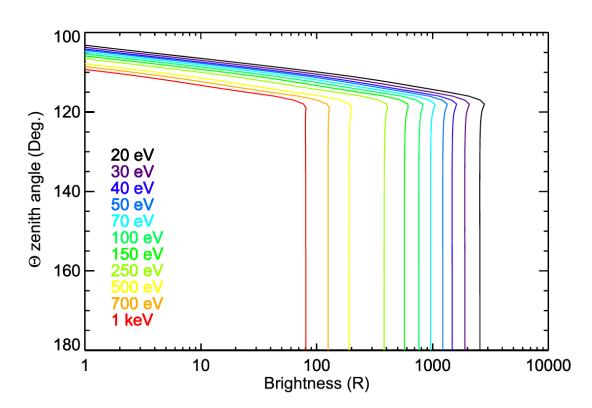


Figure 7. Radiative transfer simulations of the 130.4-nm oxygen emission depending on the zenith angle (Θ) . Colors correspond to the initial electron energies. Nadir brightness correspond to $\Theta = 180^{\circ}$. Brightness is constant for $\Theta = 120^{\circ}$ to $\Theta = 180^{\circ}$. Simulations have been performed for a spectrometer located at 600 km and a downward electron energy flux of 1 mW m⁻².

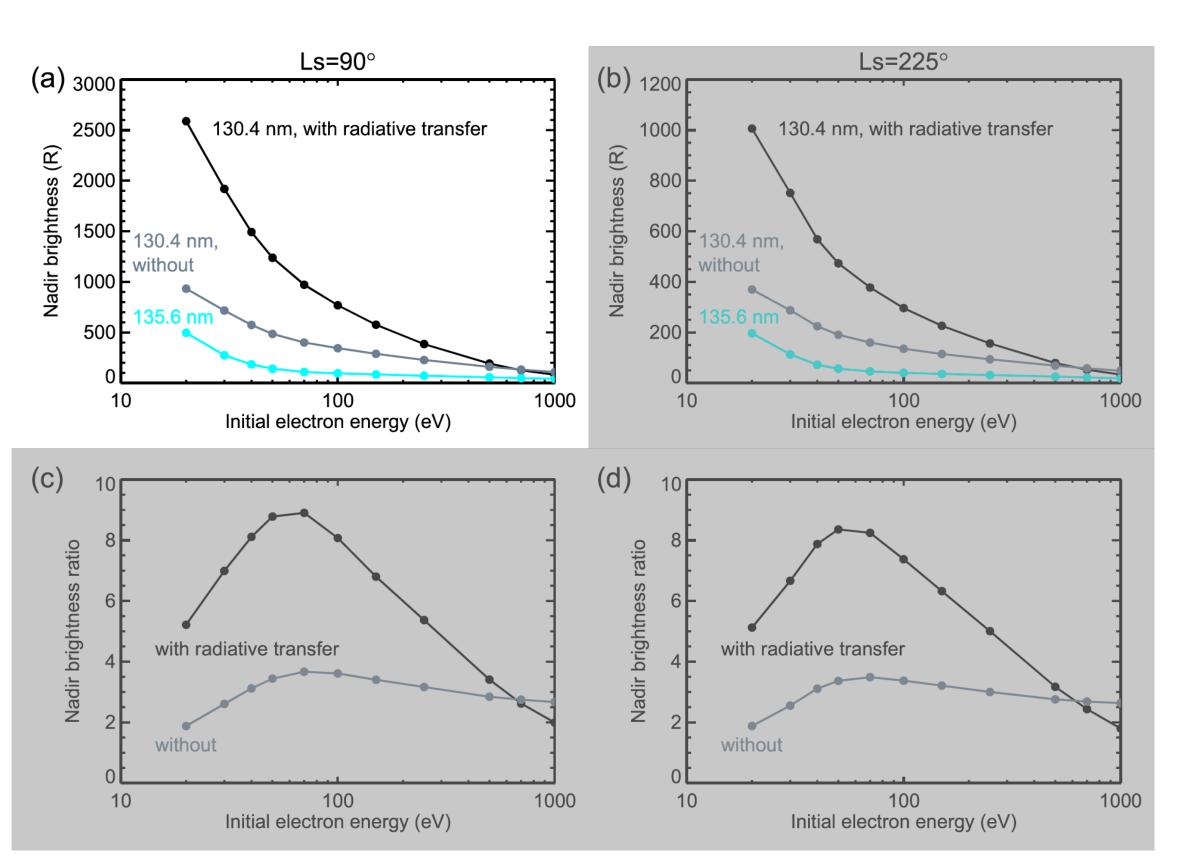


Figure 6. Top: Nadir brightnesses of the 135.6-nm oxygen emission (blue) and the 130.4-nm emission without (gray) and with absorption by CO_2 and radiative transfer effects (black) depending on the initial energy of the electrons. The downward flux is 1 mW m⁻². Bottom: Ratio of the two oxygen brightnesses without (gray) and with (black) absorption and radiative transfer for the optically thick 130.4-nm emission line. Left: For an atomic oxygen density profile at $L_s = 90^{\circ}$. Right: For an atomic oxygen density profile at $L_s = 225^{\circ}$.

シミュレーション結果:酸素密度依存性

- どちらの輝線も原子状酸素への電子衝突の 寄与が支配的(Fig. 3)なので、酸素密度変 動の影響を調べる。
- Figs. 6a v. 6b: 大気モデルの季節条件を変えた(Fig. 8a) 結果。計測輝度の絶対値は熱圏O密度分布に強く依存する。

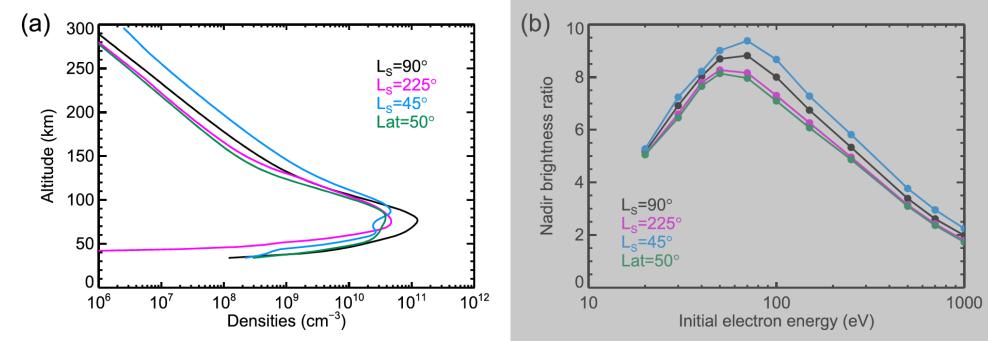


Figure 8. (a) Several atomic oxygen density profiles have been used to perform sensitivity tests on the FUV oxygen nadir brightness. (b) Calculated ratios of the nadir brightnesses of the 130.4-nm/135.6-nm emissions (with radiative transfer) depending on the input oxygen density profile.

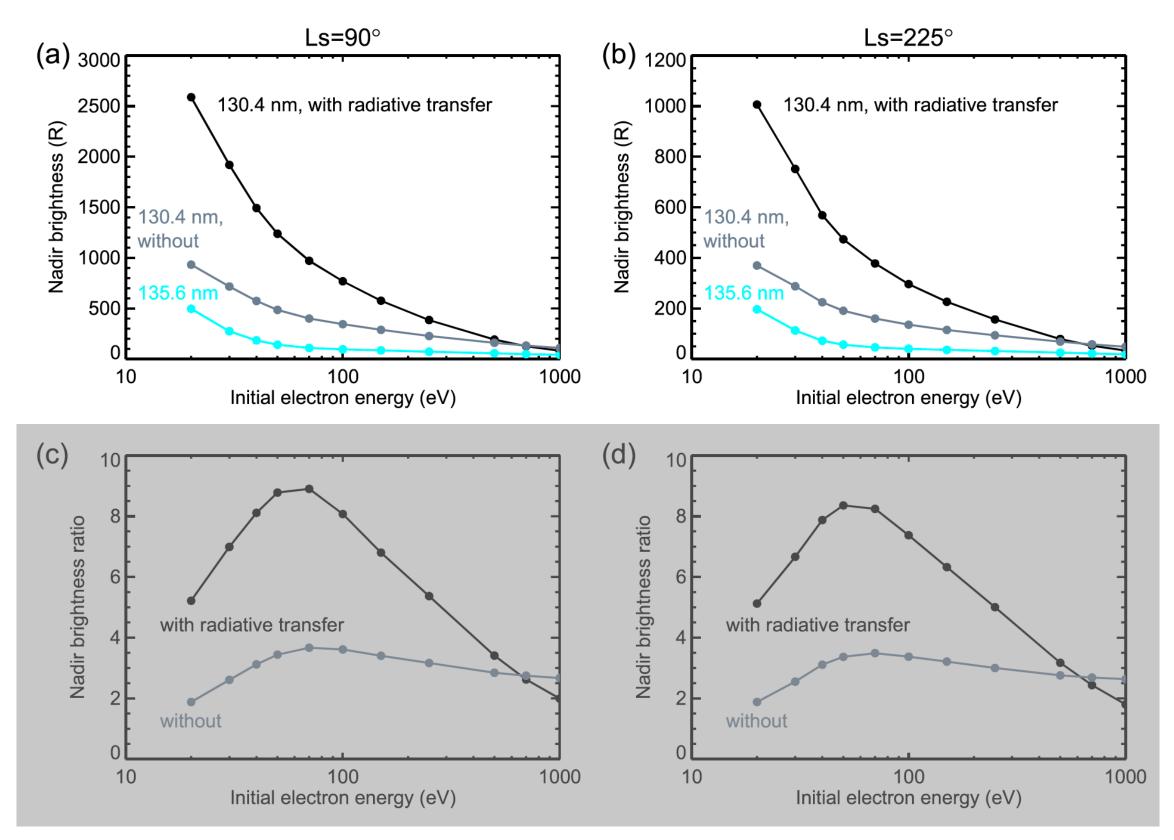


Figure 6. Top: Nadir brightnesses of the 135.6-nm oxygen emission (blue) and the 130.4-nm emission without (gray) and with absorption by CO_2 and radiative transfer effects (black) depending on the initial energy of the electrons. The downward flux is 1 mW m⁻². Bottom: Ratio of the two oxygen brightnesses without (gray) and with (black) absorption and radiative transfer for the optically thick 130.4-nm emission line. Left: For an atomic oxygen density profile at $L_s = 90^{\circ}$. Right: For an atomic oxygen density profile at $L_s = 225^{\circ}$.

シミュレーション結果:天底輝度比

- Figs. 6c & 6d: Figs. 6a & 6bの結果から130.4 nm / 135.6 nmの輝度比を計算したもの。
 - 放射輸送効果を考慮に入れると、輝度比が最大で数倍程度大きくなる。
 - 放射輸送効果を考慮した輝度比は、EMM/EMUSの観測値~5 (Lillis et al., 2022) と概ね一致。推定される電子エネルギーは20 eVまたは250-300 eV のどちらかだが、MAVEN/IUVSによるリム観測のピーク高度~130 km (Soret et al., 2021) と一致するのは250-300 eVの方である。
 - 輝度比の電子エネルギー依存性は、大気条件ではあまり変わらない。→
 Fig. 8b。

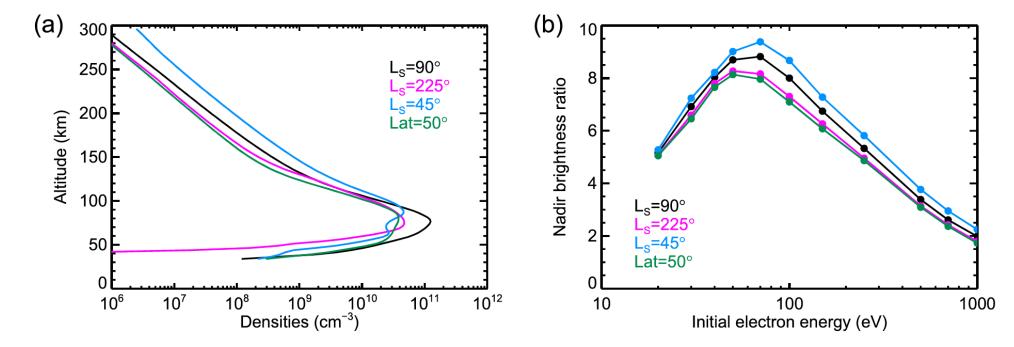


Figure 8. (a) Several atomic oxygen density profiles have been used to perform sensitivity tests on the FUV oxygen nadir brightness. (b) Calculated ratios of the nadir brightnesses of the 130.4-nm/135.6-nm emissions (with radiative transfer) depending on the input oxygen density profile.

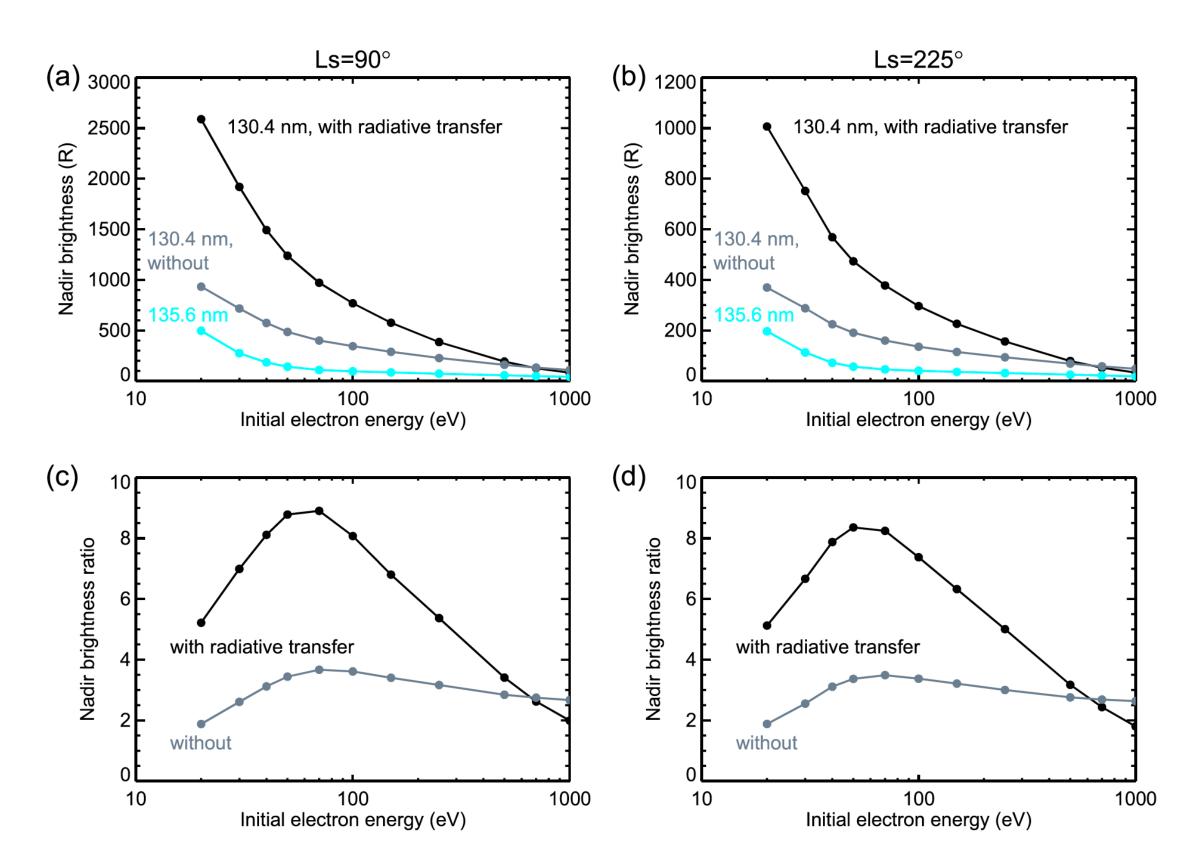


Figure 6. Top: Nadir brightnesses of the 135.6-nm oxygen emission (blue) and the 130.4-nm emission without (gray) and with absorption by CO_2 and radiative transfer effects (black) depending on the initial energy of the electrons. The downward flux is 1 mW m⁻². Bottom: Ratio of the two oxygen brightnesses without (gray) and with (black) absorption and radiative transfer for the optically thick 130.4-nm emission line. Left: For an atomic oxygen density profile at $L_s = 90^{\circ}$. Right: For an atomic oxygen density profile at $L_s = 225^{\circ}$.

議論

- 現在の主要な不確定性要因:断面積、大気密度分布
 - 大気中の放射捕捉効果を考慮すると、130.4 nmの実効的な発光断面積は 更に大きくなる。輝線比もより高くなるはずである。
- 更に地殻磁場の効果や、入射電子のエネルギー分布・フラックスを考慮して個別の観測事例と比較する必要がある。

結論

- 火星オーロラの130.4 nmと135.6 nm発光を同時に天底観測することで、 両輝線の輝度比から大気に降り込む電子のエネルギーを推定することがで きる。
- 本研究のシミュレーション結果に基づくと、EMM-EMUSが観測した輝度 比~5は、250-300 eVの電子が引き起こす130 km高度での発光と整合的で ある。
- オーロラ発光と降下電子との同時観測を組み合わせれば、火星大気の原子 状酸素密度を推定する手段にもなり得る。

(おまけ) MEX-EMM Conjunctionイベントとの比較

JGR Planets

RESEARCH ARTICLE

10.1029/2023JE008214

Key Points:

- The 130.4 optically thick and the 135.6 nm optically thin oxygen emissions can be observed during a Mars auroral event
- Radiative transfer effects increase the observed nadir brightness of the 130.4nm emission
- Brightnesses of both emissions depends on O density, initial electron energy and flux, while their ratio depends on the electron energy

Correspondence to:

L. Soret, lauriane.soret@uliege.be

Citation:

Soret, L., Hubert, B., Gérard, J.-C., Jain, S., Chirakkil, K., Lillis, R., & Deighan, J. (2024). Quantifying the electron energy of Mars aurorae through the oxygen emission brightness ratio at 130.4 and 135.6 nm. *Journal of Geophysical Research: Planets*,

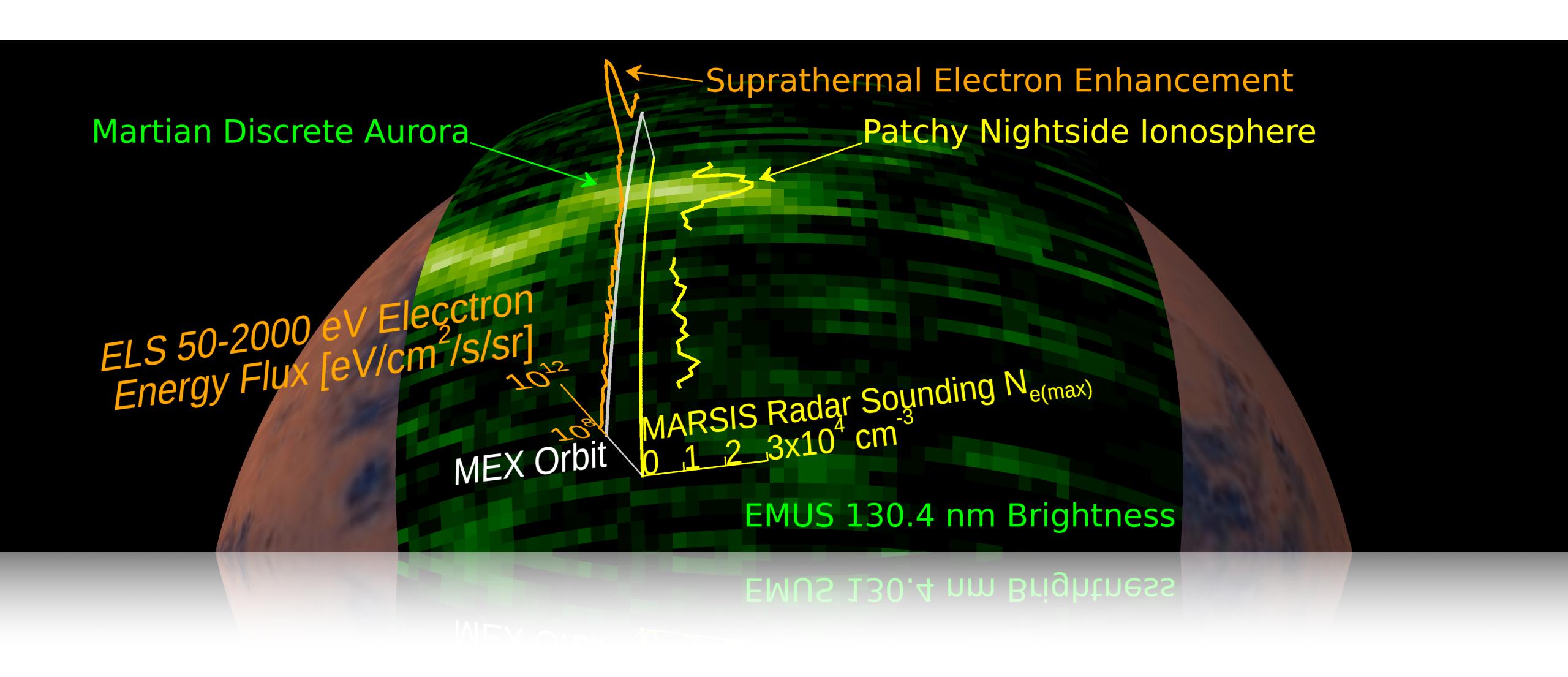
Quantifying the Electron Energy of Mars Aurorae Through the Oxygen Emission Brightness Ratio at 130.4 and 135.6 nm

Lauriane Soret¹, Benoît Hubert¹, Jean-Claude Gérard¹, Sonal Jain², K. Chirakkil^{2,3}, R. Lillis⁴, and J. Deighan²

¹LPAP, STAR Institute, Université de Liège, Liège, Belgium, ²LASP, University of Colorado, Boulder, CO, USA, ³Space and Planetary Science Center, Khalifa University, Abu Dhabi, UAE, ⁴UC Berkeley, Berkeley, CA, USA

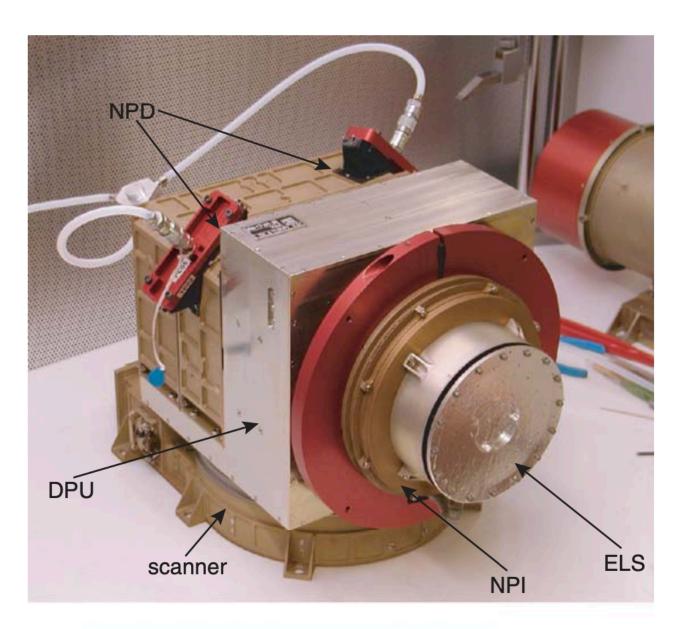
Abstract Mars discrete aurorae are caused by accelerated electrons precipitating into the atmosphere and interacting with species such as atomic oxygen. However, the energy of the electrons causing these aurorae remains currently unclear: no simultaneous and concurrent measurements of electron analyzers and spectrometers have been performed so far, preventing from assessing the exact energy of the downgoing auroral electrons. Several auroral emissions have been observed so far on Mars, among which are two oxygen emissions in the far ultraviolet at 130.4 and 135.6 nm. In this study, we simulate the vertical distribution of these auroral oxygen emissions with an electron transport calculation coupled with a radiative transfer model to account for the optical thickness of the atmosphere for the 130.4-nm triplet. We show that the brightness ratio of these oxygen emissions is independent of the downward electron energy flux and only slightly depends on the atomic oxygen atmospheric composition. In contrast, the brightness ratio is strongly related to the initial energy of the auroral electrons. Measuring the brightness ratio is therefore a unique tool to remotely estimate the energy of the electrons causing the Mars discrete aurorae. We compare our model results with observations from the Emirates Mars Ultraviolet Spectrometer on board the Emirates Mars Mission and find that electrons with typical energies of 250–300 eV are compatible with the observed ratio of 5.

Harada, Fujiwara, et al. (2024, EPS) https://doi.org/10.1186/s40623-024-02010-x



MEX ASPERA-3 ELS注意点

- ELSの視野は4°x360°(一部は宇宙機本体によりブロック)、MEXは3軸制御。
- MEXは磁力計を搭載していないため、磁場の方向および電子ピッチ角分布は不明。



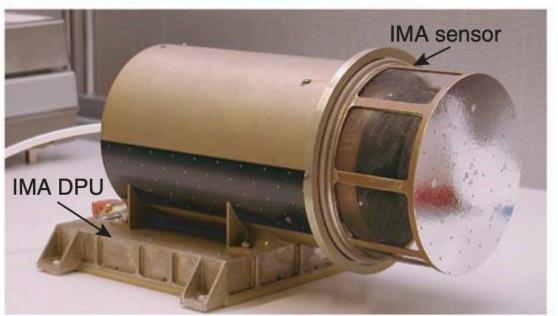
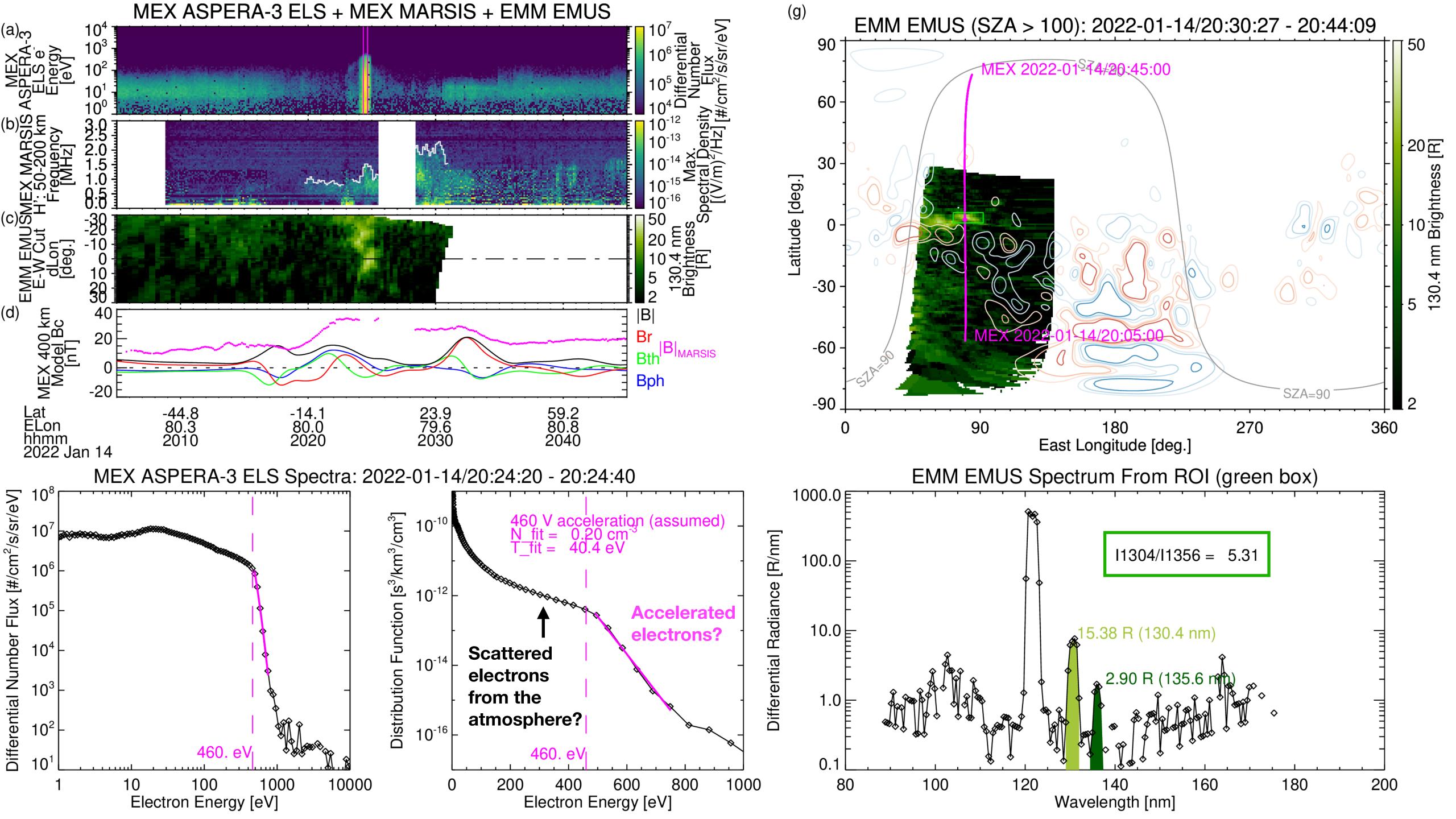
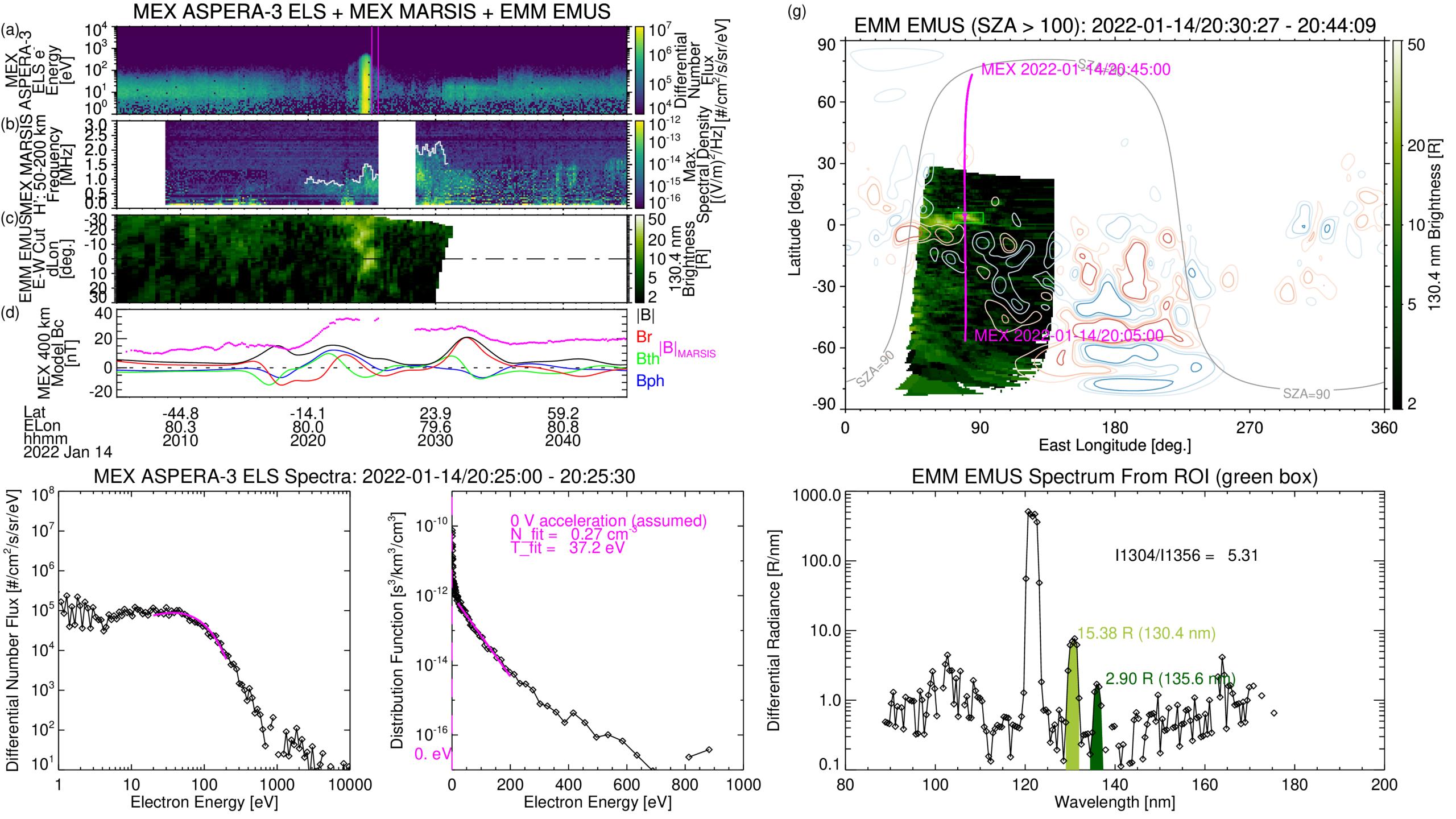
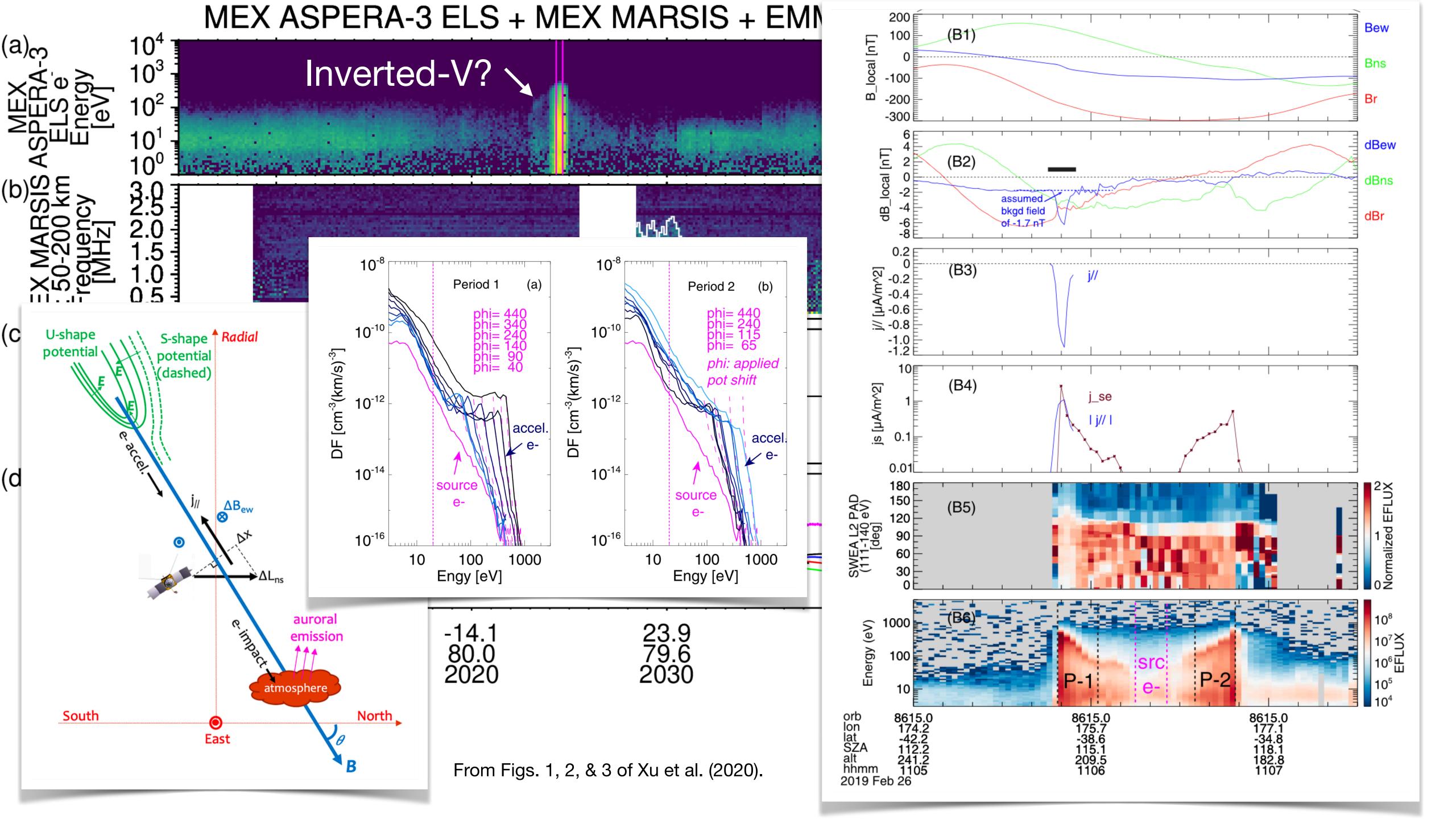


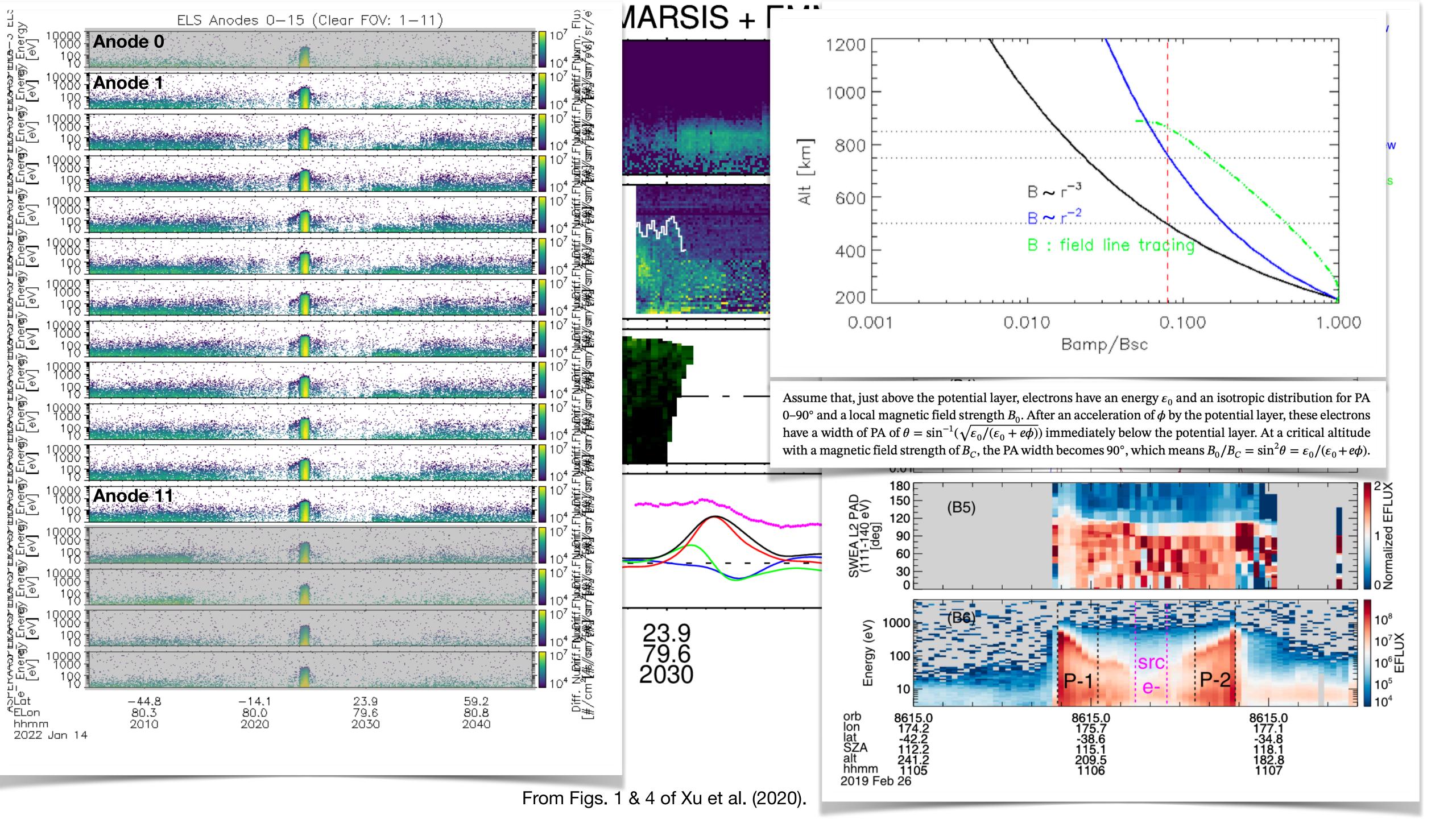
Figure 5. The ASPERA-3 configuration (flight model with red-tagged covers installed).

From Fig. 5 of Barabash et al. (2006).









おまけの結論

- MEX-EMM conjunctionイベント:
 - EMUS: I1304/I1356 ~ 5.3 → ~200–300 eV
 - ELS: ~450–500 eV electron acceleration?
- 実効的な発光断面積の不確定性(放射捕捉効果を考慮すると系統的に輝線 比が高くなる傾向)を考えると、そこそこ合っているように思える。
- → Laurianeに聞いてみる。

