

火星オーロラと光化学モデル による火星宇宙放射線被曝予 測技術の検証



中川 広務（東北大学）, 中村 勇貴（東京大学）, 原田 裕己（名古屋大学）, 寺田 直樹（東北大
学）, 出村 裕英（会津大学）, ARC Space Symposium, 2025年12月19日

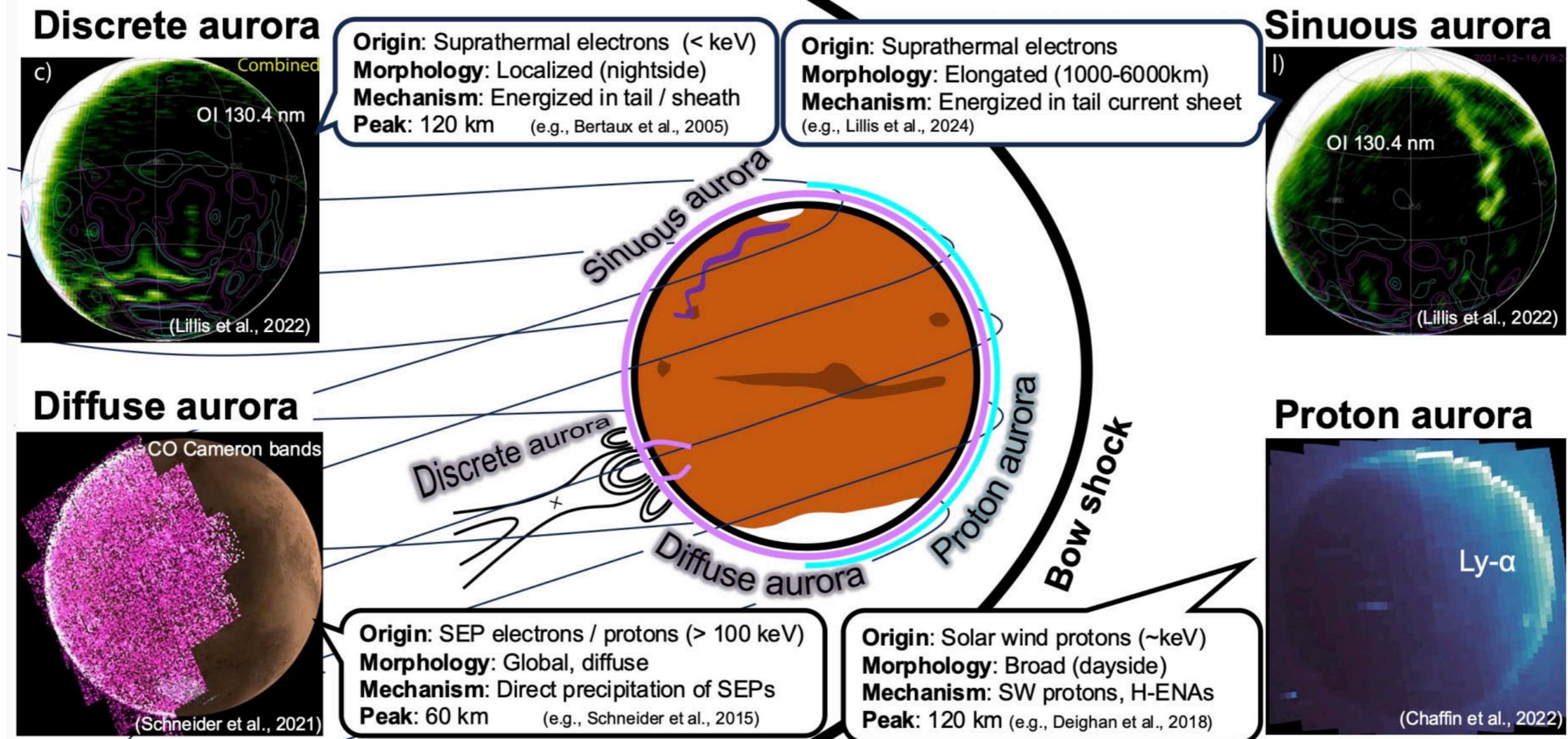
新宇宙開拓時代 「月から火星へ」

- 人類活動領域の拡大と有人火星探査へのロードマップ
 - アルテミス計画による月面拠点構築を経て、2030～2040年代には有人火星探査が現実的な目標に
 - 火星高速通信や輸送プラットフォーム開発・民間ペイロード事業が開始(Blue Origin, Space X, ESA, JAXA)
- 地球磁気圏の保護外での活動が常態化



「火星宇宙環境のパラダイムシフト」

- 近年の火星探査機による急速な火星宇宙環境理解の進展
 - ディスクリートオーロラ：地殻磁場と太陽風磁場の相互作用
 - ディフューズオーロラ：太陽プロトン現象で全球を覆う
 - プロトンオーロラ：電荷交換反応で惑星前面に衝突



[Bertaux et al., 2005; Schneider et al., 2015, 2018; Deighan et al., 2019]

喫緊の課題 「火星における宇宙天気」

- 希薄大気による被曝の実態
 - 地表探査車搭載のRAD計測で太陽プロトンイベント時に急激な線量上昇(GLE)、全球規模で発生しうることを示唆
- 通信の脆弱性
 - 太陽フレア等によるX線増大、電離圏での電波吸収(デリンジャー現象)が日常的に発生
 - 周回機の短波レーダーが不可、将来地上遠距離通信が実現した場合に通信障害が発生しうる*
- 有人探査へのインパクト
 - 致命的な急性被曝のリスク
 - 火星地表面活動における通信途絶のリスク
 - 火星宇宙天気は、有人探査の生命維持に関わる喫緊の課題へ

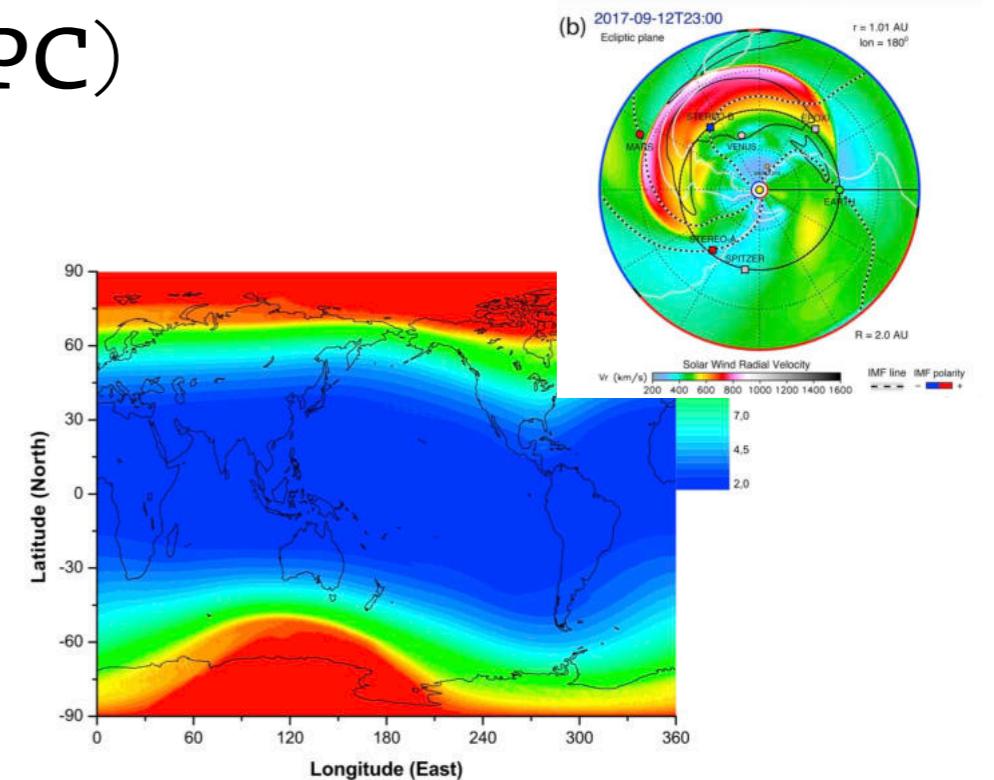
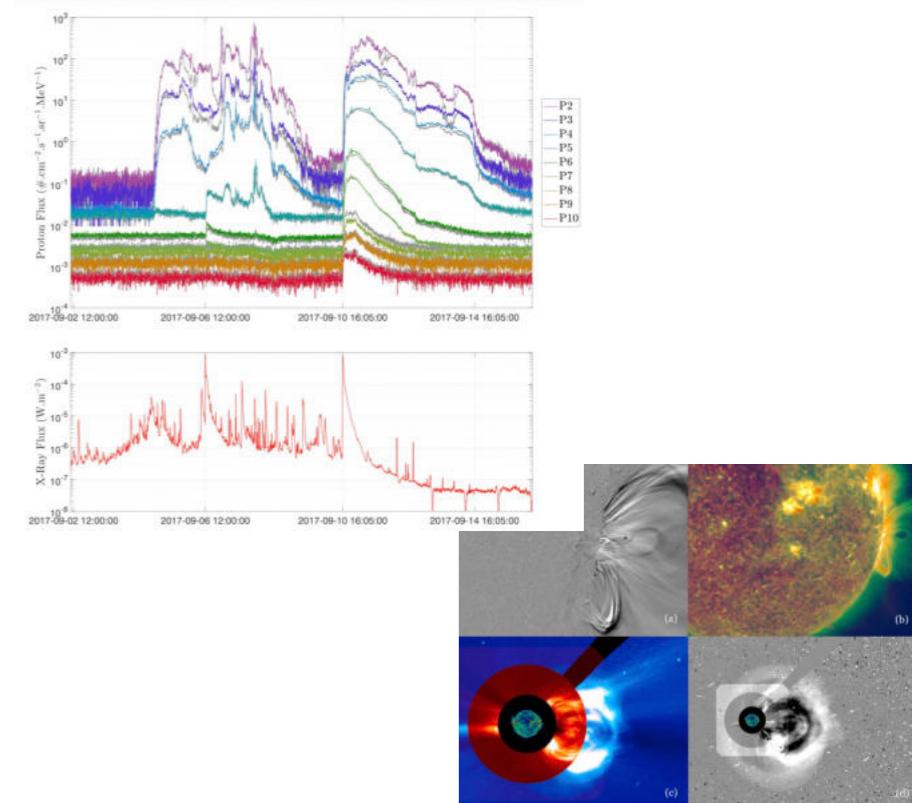
*より高い周波数を用いる地上-衛星間の通信には影響しない

解決策 「オーロラによる可視と予報」

- 放射線ハザードマップと予報プロセスにおける課題
 - 地球宇宙天気との比較：全球広域でのリアルタイム監視網がないため、ナウキャストが不可能
- 本研究の新提案・目的
 - 「オーロラ発光分布→降り込み粒子フラックスの推定」オーロラ観測をプロキシとして、高エネルギー粒子(放射線・通信障害起源)の流入経路を広域で可視化する
- ステップ1: オーロラ・電離圏観測から宇宙天気物理モデル構築
- ステップ2: 過去データアーカイブによる学習
- ステップ3: ナウキャストのための事前計算データベース化
- ステップ4: 将来観測計画との融合で宇宙天気予報システムの実証

地球宇宙天氣Chain of Event

- X-Ray Flux (GOES)
- EUV/Magnetograms Imagery (SDO)
- Coronagraph, CME (SOHO/LASCO)
- Solar Energetic Proton Flux (GOES)
- CME, SEP Propagation (NOAA SWPC)
- Solar Wind Monitoring (DSCOVR)
- Geomagnetic condition (Kp index)
- Dose rate prediction (WASAVIES)



火星宇宙天氣Chain of Event

→ X-Ray Flux (MAVEN/EUVM)

→ EUV/Magnetograms Imagery (SDO)

→ Coronagraph, CME (SOHO/LASCO)

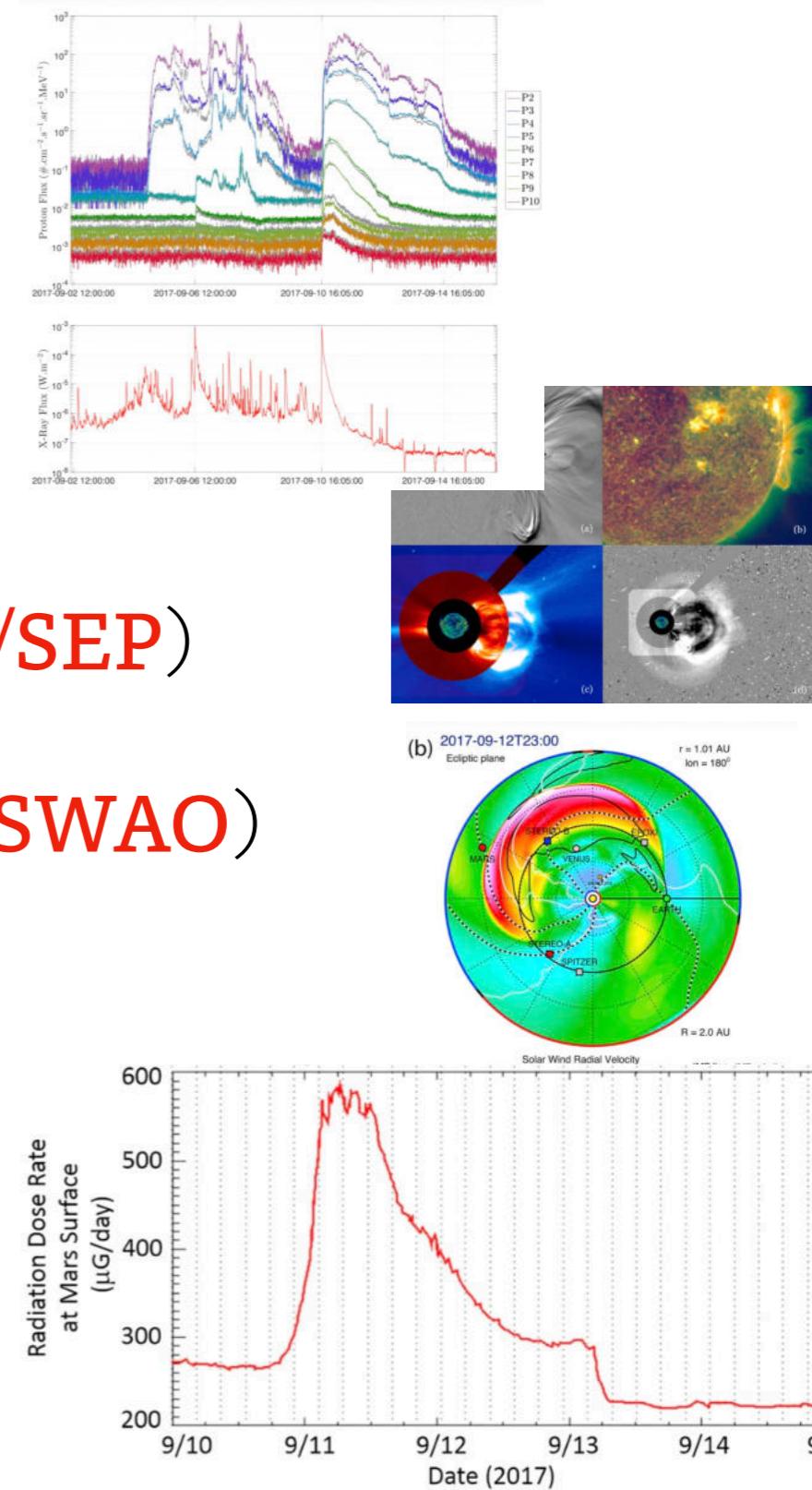
→ Solar Energetic Proton Flux (MAVEN/SEP)

→ CME, SEP Propagation (NASA M2M SWAO)

→ Solar Wind Monitoring (DSCOVR)

→ Geomagnetic condition (K_p index)

→ Dose rate prediction (WASAVIES)



火星宇宙天気Chain of Event+本研究 α

- X-Ray Flux (MAVEN/EUVM)
- ~~EUV/Magnetograms Imagery (SDO)~~
- ~~Coronagraph, CME (SOHO/LASCO)~~
- Solar Energetic Proton Flux (MAVEN/SEP)
- CME, SEP Propagation (NASA M2M SWAO)
- Solar Wind Monitoring (M-MATISSE)
- Geomagnetic condition (M-MATISSE/M-AC, Step1-2-3)
- Dose rate prediction (THIS STUDY+ α)

PTRIP 「モンテカルロ粒子輸送モデル」

- 太陽高エネルギー粒子(陽子・電子)の惑星大気中の輸送過程を計算
- 電離・励起・解離反応を考慮し、オーロラ発光強度を推定

Monte Carlo particle transport model

Equation of motion

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \gamma^{-1} q \left(\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{E} - \frac{(\mathbf{E} \cdot \mathbf{v}) \mathbf{v}}{v^2} \right) + \gamma^{-3} \frac{q(\mathbf{E} \cdot \mathbf{v}) \mathbf{v}}{v^2}$$

Collisional physics

- Collision probability is:

$$P_i = 1 - \exp \left[- \sum_s n_s(\mathbf{l}) \sigma_s^T(\mathcal{E}) \Delta l \right]$$

Particle energy
 ↑
 Atmospheric density
 ↑
 Total collision cross section
 ↑
 Distance in dt

- Collision occurs when $R_1 \leq P_i$ (R_1 : random number [0,1])
- Collision type is determined as:

$$\sum_{j=1}^{i-1} \nu_j / \nu_T < R_2 \leq \sum_{j=1}^i \nu_j / \nu_T \quad \begin{cases} \nu_i, \nu_T : i\text{th and total} \\ \text{collision frequency} \end{cases}$$

$\nu_i = n_s(\mathbf{l}) \sigma_i(\mathcal{E}) \nu$

- Scattering angle θ is determined if the collision is elastic:

$$\int_0^\theta f(\theta) d\theta = R_3 \int_0^\pi f(\theta) d\theta \quad [f(\theta) : \text{Scattering angle distribution}]$$

- Energy loss is calculated:
 - Threshold energy for inelastic collisions
 - Secondary electron energy
 - Energy & momentum conservation for elastic collisions

Input

- Atmospheric density
- Incident particle flux
- Pitch angle distribution
- E & B fields

Output

- Rate of all collisional processes including:
 - Ionization rate
 - Excitation rate
 - Emission rate
 - etc

Performance

Energy range: 1 eV – 10 MeV (e), 10 eV – 200 MeV (p)

Atmospheric species: CO₂, CO, O₂, N₂, O (Mars, Venus, Earth)

Collisional physics:

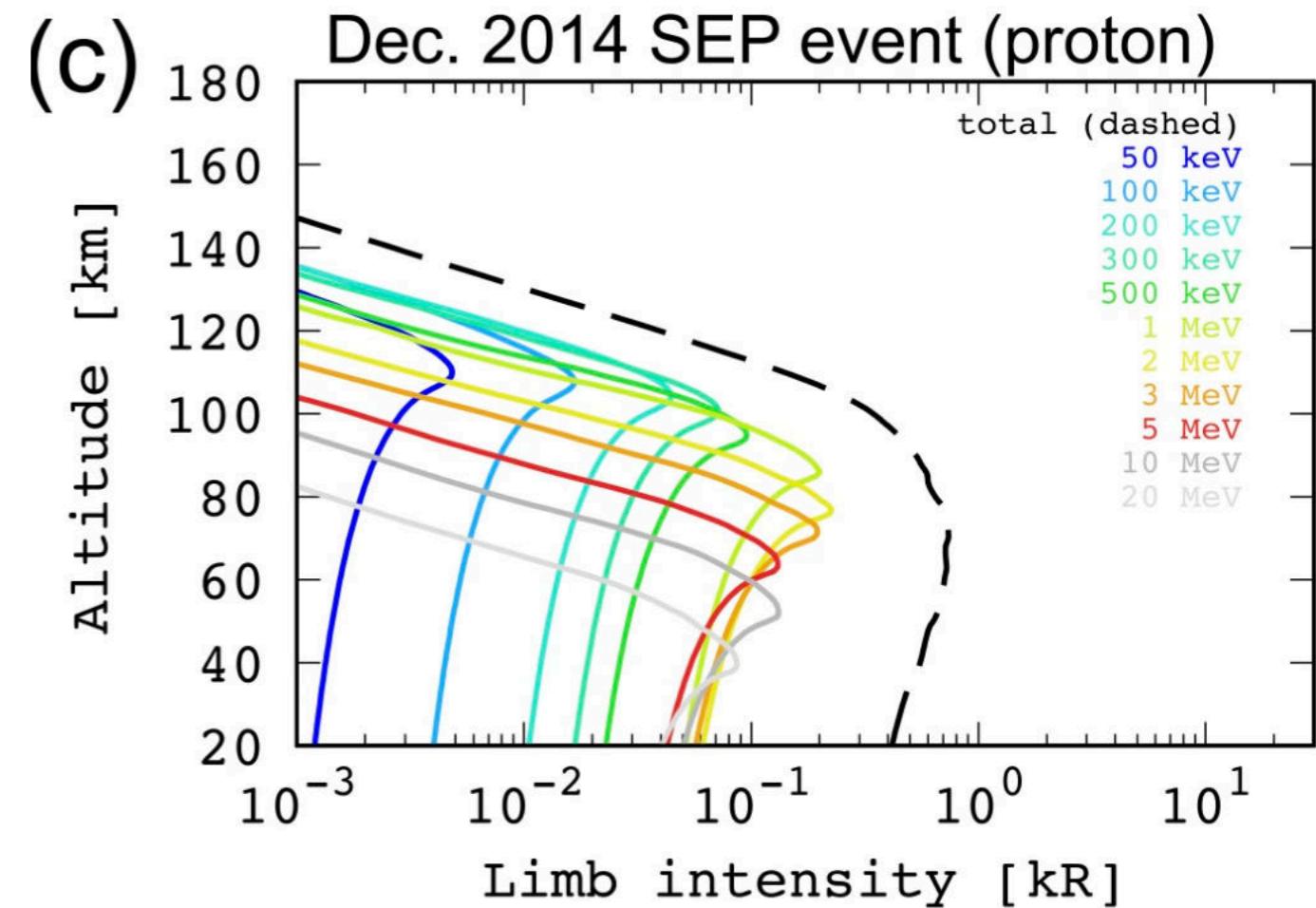
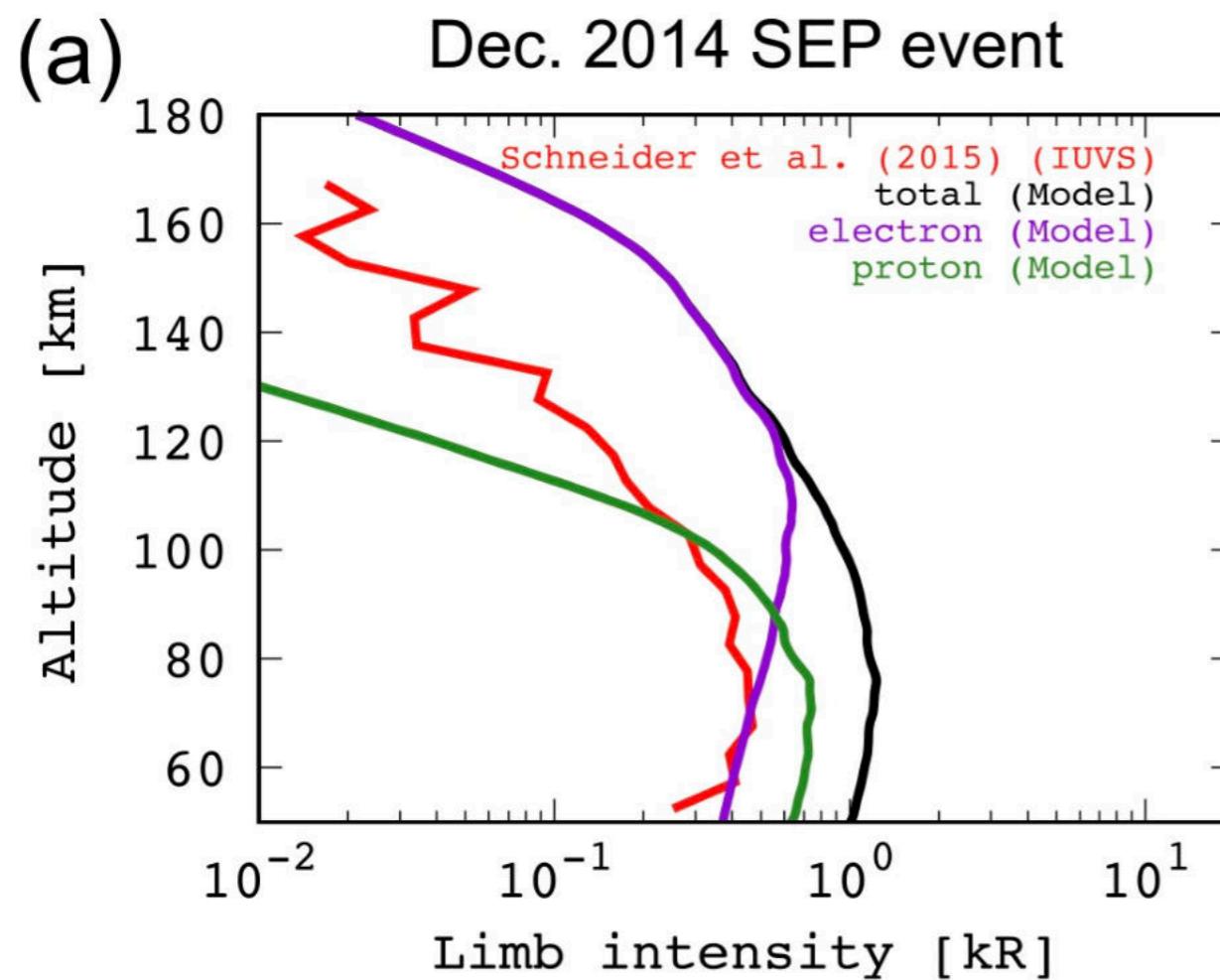
- e-(CO₂, CO, O₂, O, N₂): 71 processes (elastic, ionization, excitation, emission)
- p-(CO₂, CO, O₂, O, N₂): 73 processes (elastic, ionization, charge exchange, excitation, emission)
- H-(CO₂, CO, O₂, O, N₂): 41 processes (elastic, ionization, charge exchange, excitation, emission)

Emission lines:

- CO₂⁺ UVD
- CO₂⁺ FDB
- OI 130.4 nm, 135.6 nm, 557.7 nm, 630.0 nm
- Lyman- α , H α , H β
- N₂⁺ 1st Negative bands (391.4 nm, 427.8 nm)
- N₂ VK bands
- etc.

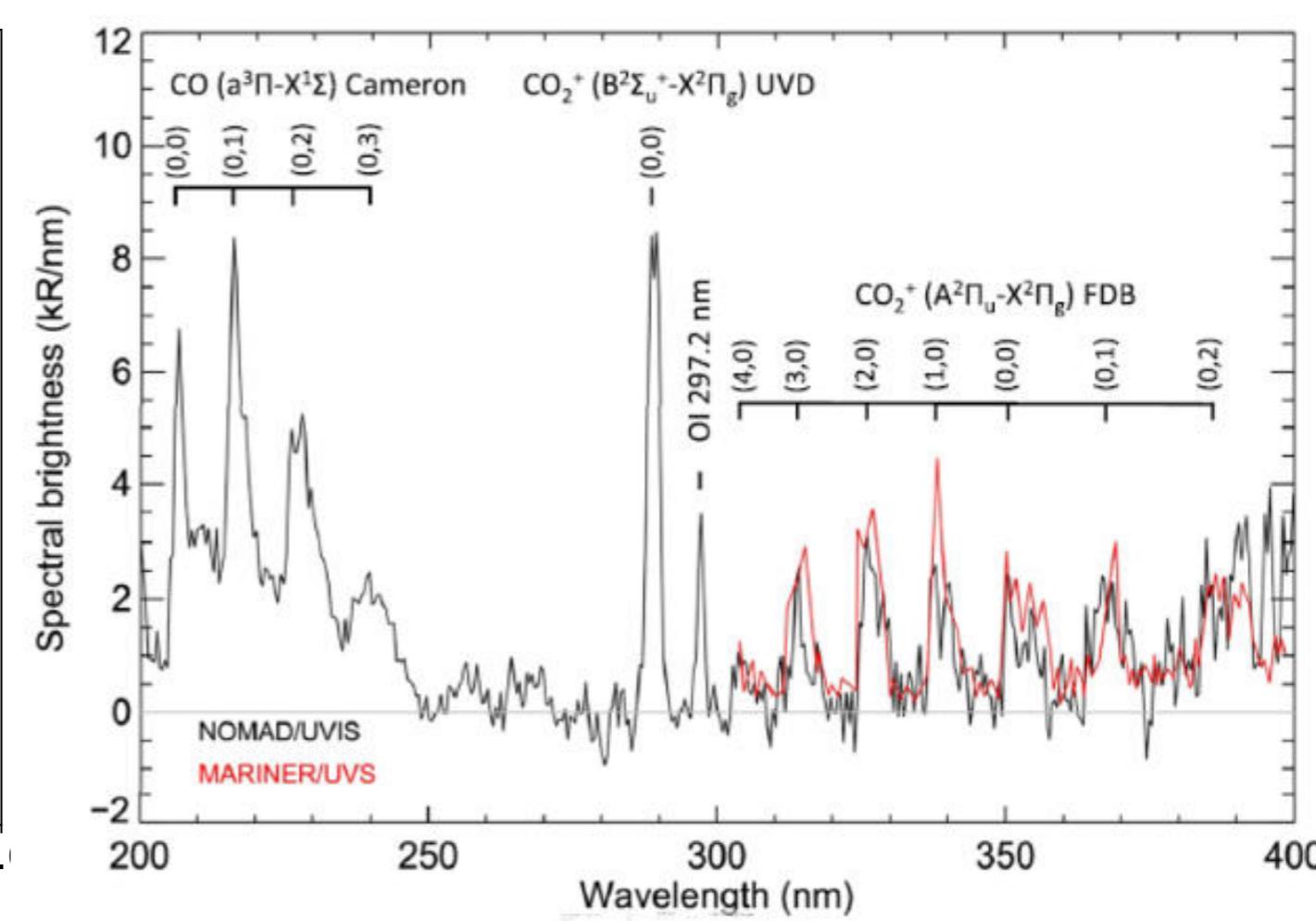
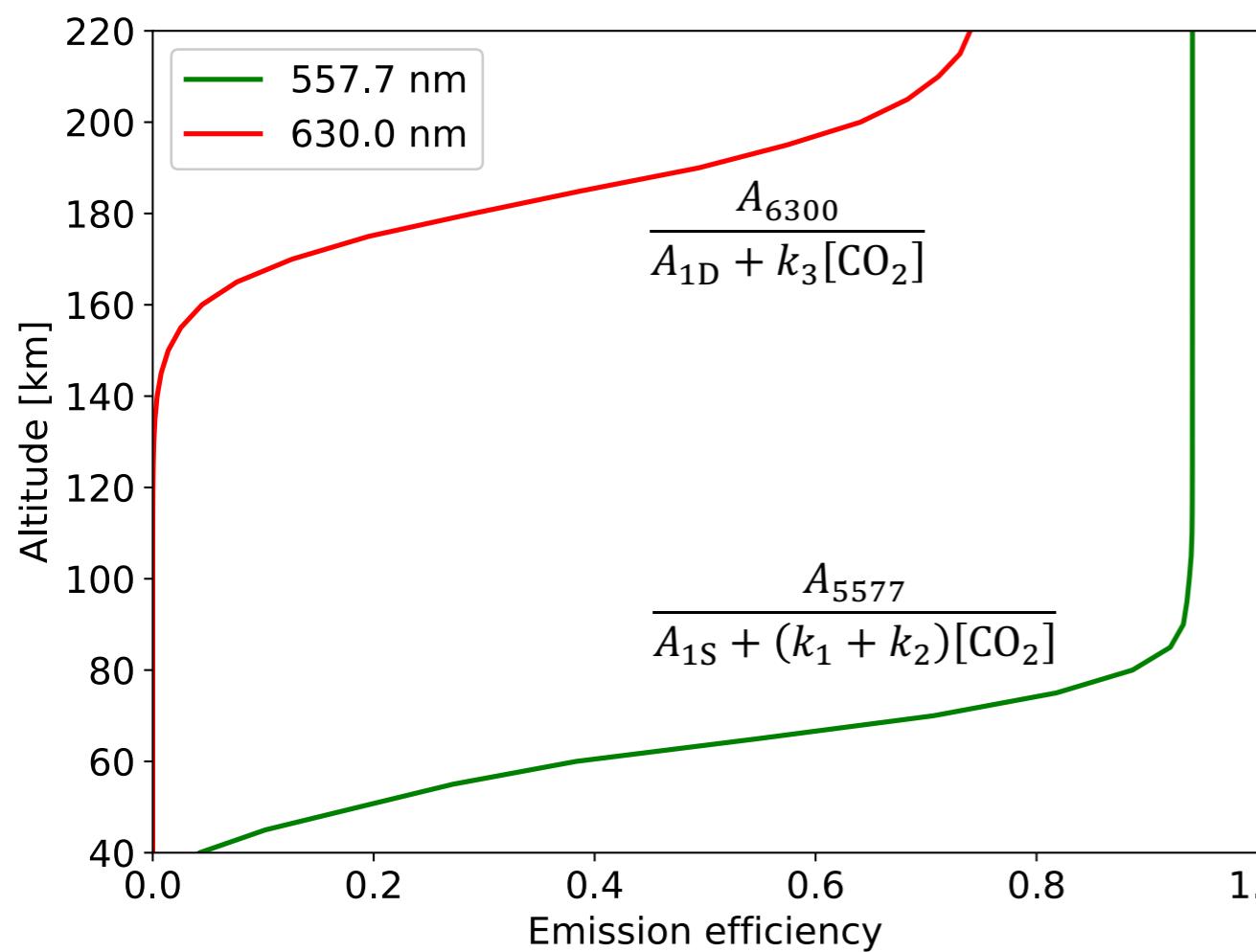
高エネルギープロトンのオーロラ寄与

- 従来モデルにはない高エネルギープロトンを精密に計算し、「火星全球の低い高度で光るディフューズオーロラ」の再現に成功。
- 形状は良好に再現。発光強度は観測値とファクターで過大評価（イベントに依存）



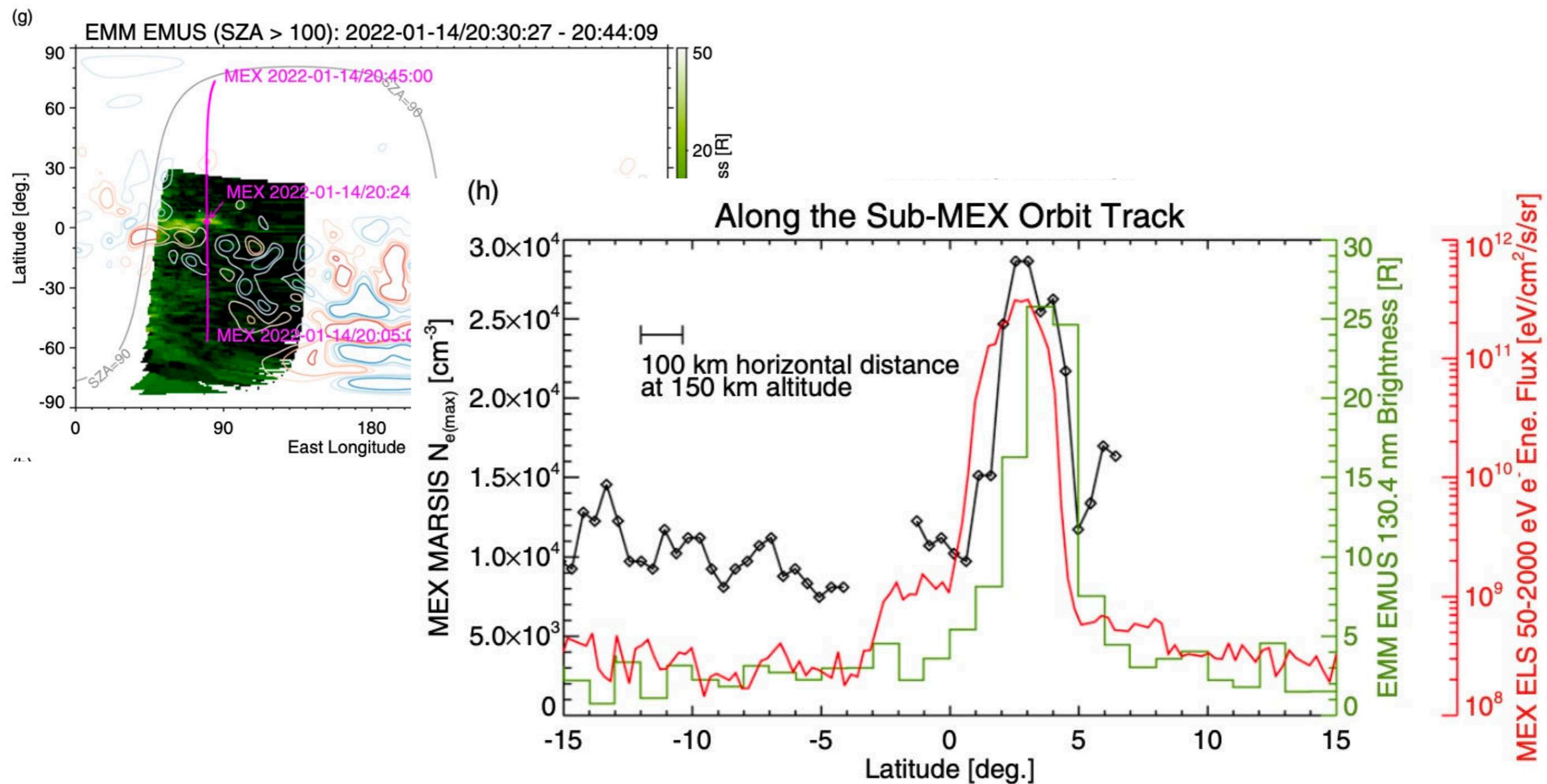
表層被曝のための「FDB帯観測」

- 次世代探査計画のターゲット557.7 nm酸素原子発光輝線は、クエンチング効果により高度80km以下で有意に発光しない。
- 表層付近まで到達するCO₂⁺ FDB帯(300-400nm)の提言。



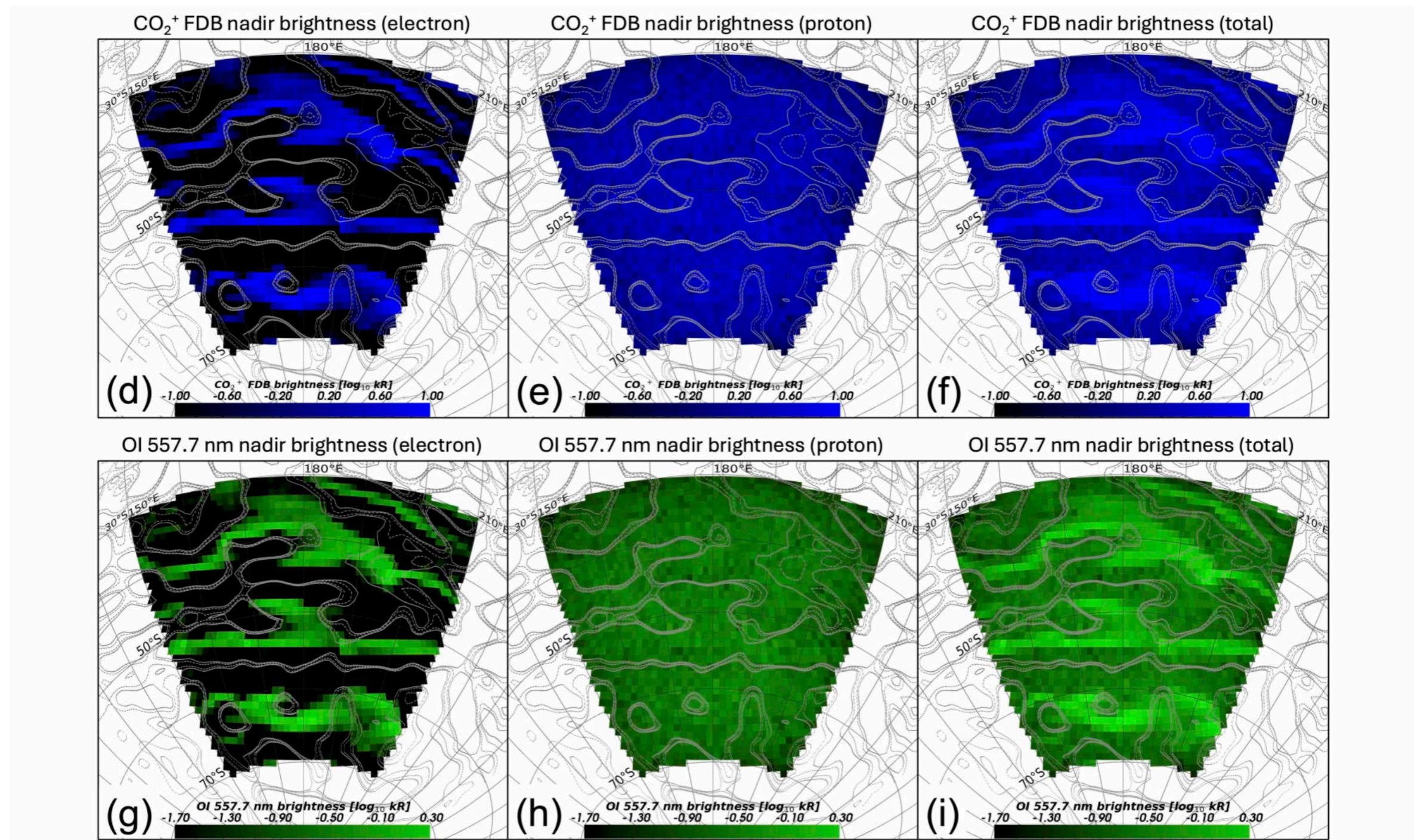
超熱電子降り込みのオーロラ寄与

- 降り込み電子フラックスがディスクリートオーロラを光らせると同時に、その周囲の電子密度を増大させていることを実証



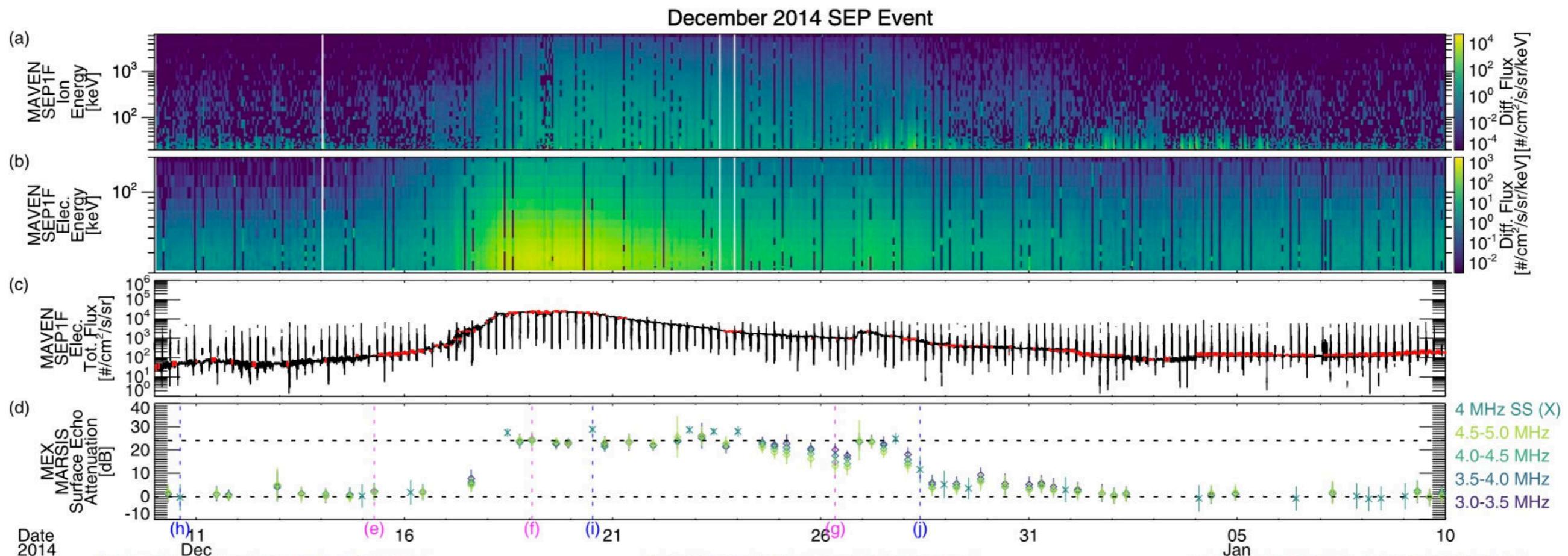
3D拡張「局所地殻磁場構造の影響」

- モデルを3次元に拡張。局所地殻磁場構造の影響を検証。



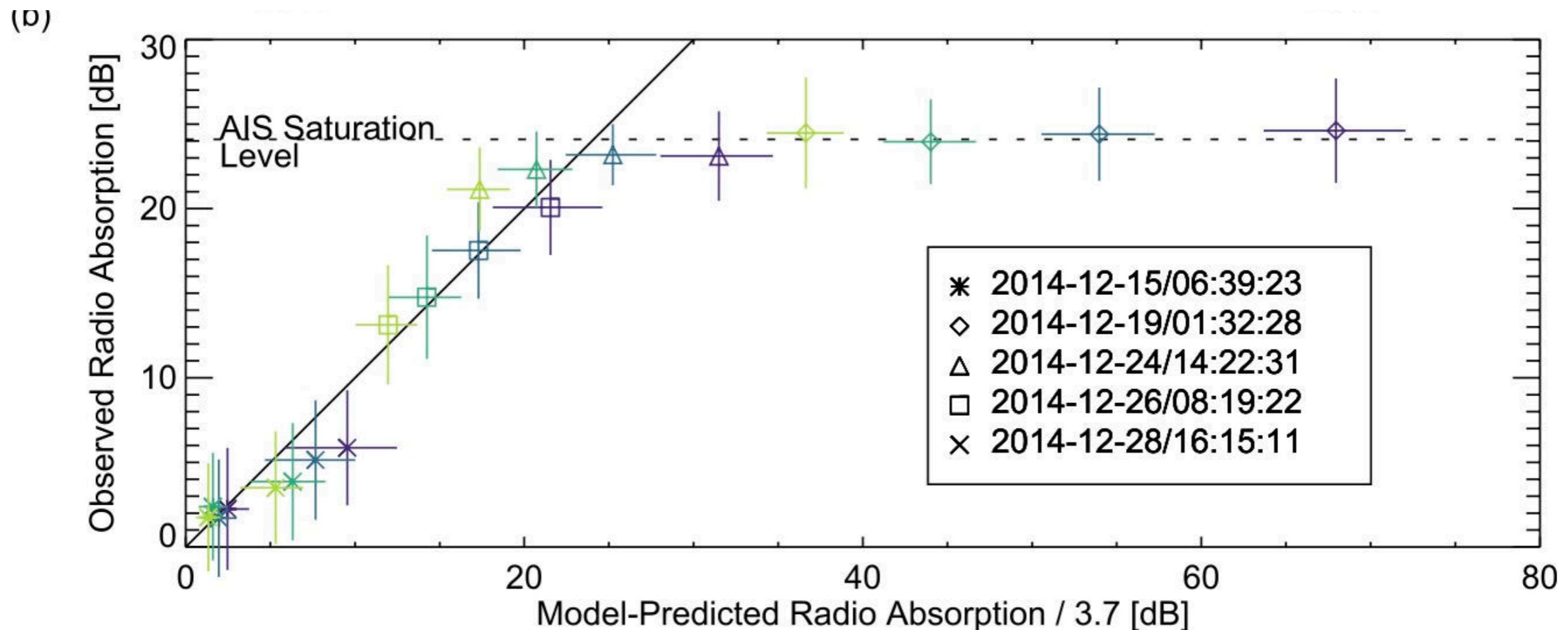
電波吸收 「無線通信環境の予測」

- 太陽高エネルギー粒子の増加と火星夜側電離圏における電波吸收に明確な相関関係を示した。モデルで特徴を良好に再現。
- モデルが予測する電波吸收量は観測値よりも3.7倍過大評価。



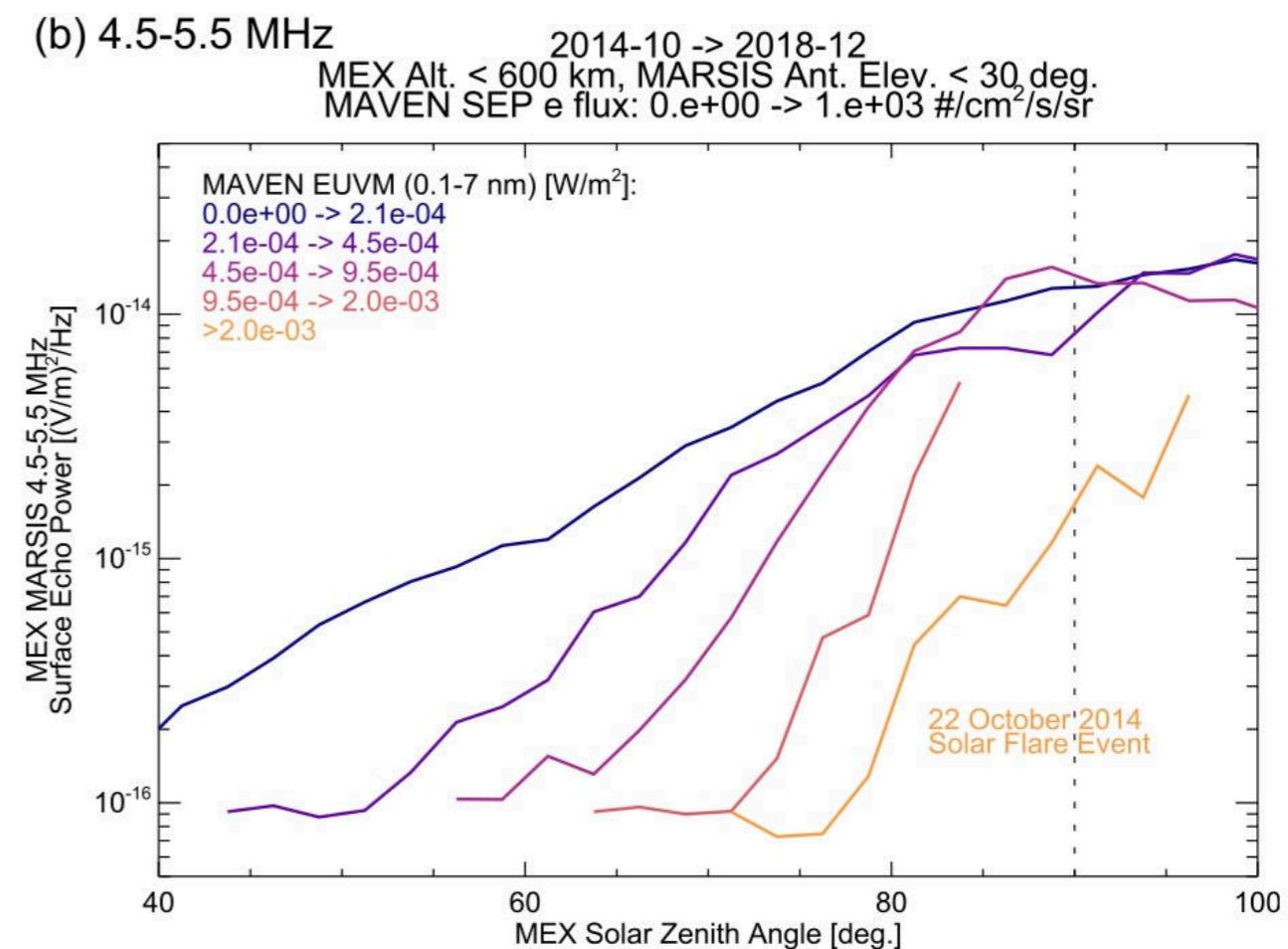
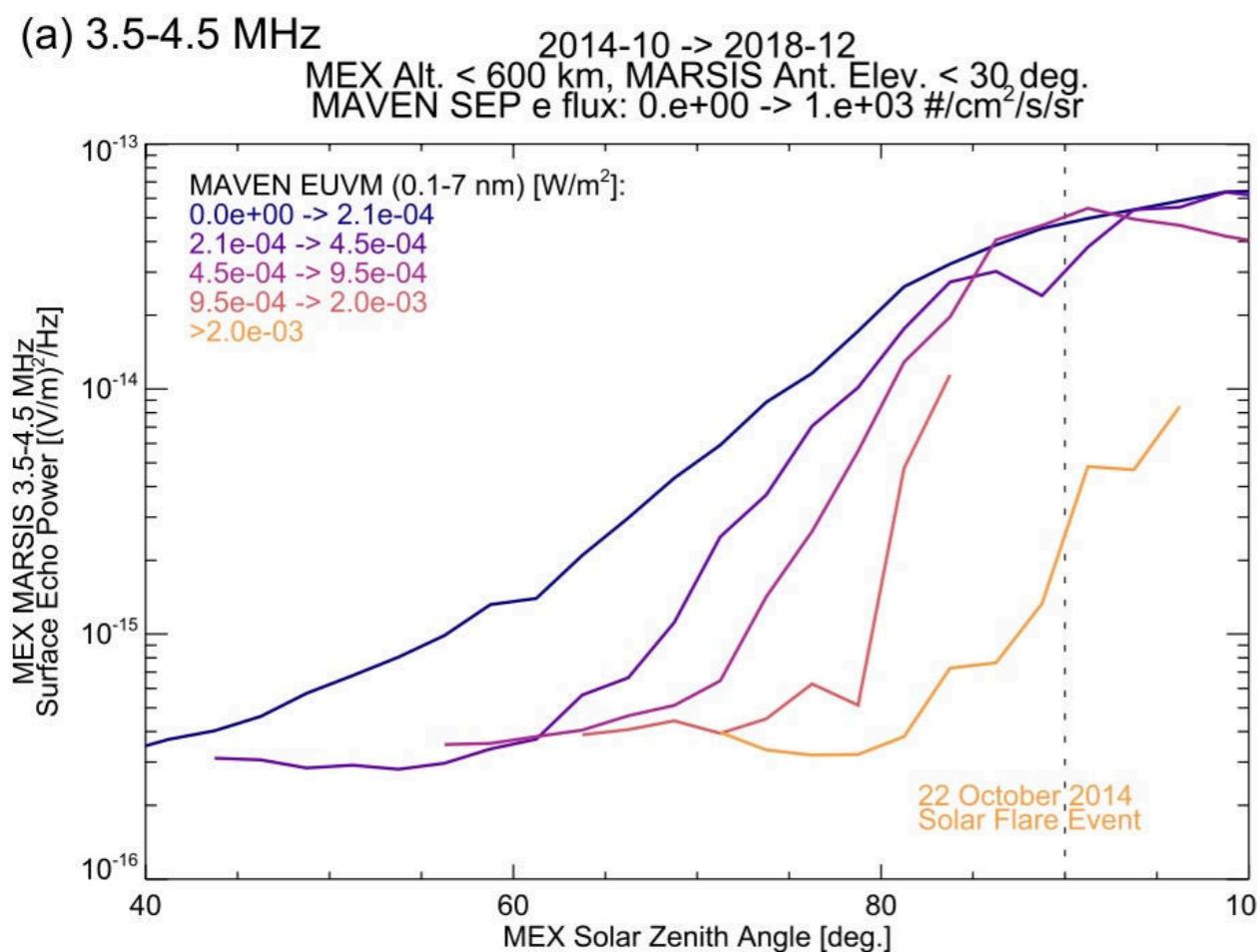
電波吸収 「無線通信環境の予測」

- 太陽高エネルギー粒子の増加と火星夜側電離圏における電波吸収に明確な相関関係を示した。モデルで特徴を良好に再現。
- モデルが予測する電波吸収量は観測値よりも3.7倍過大評価。



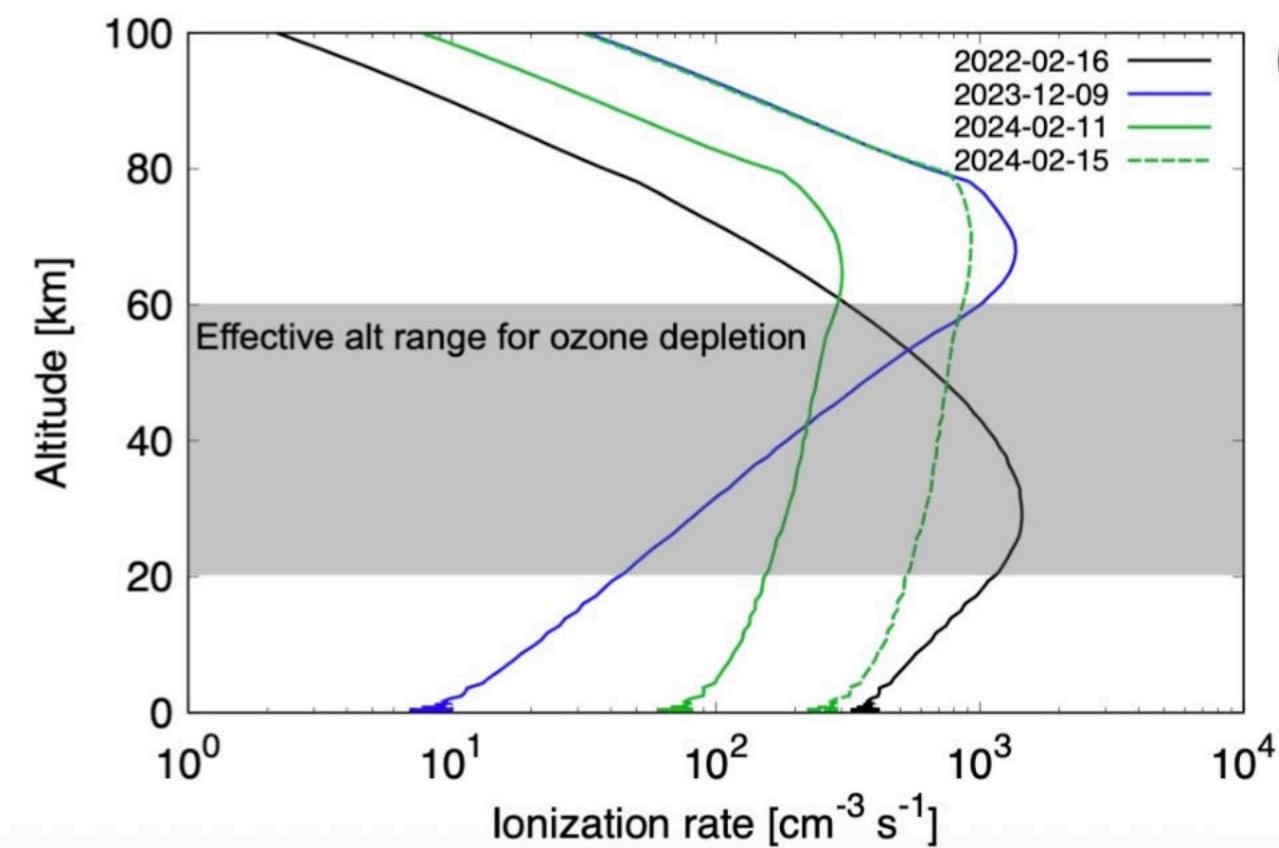
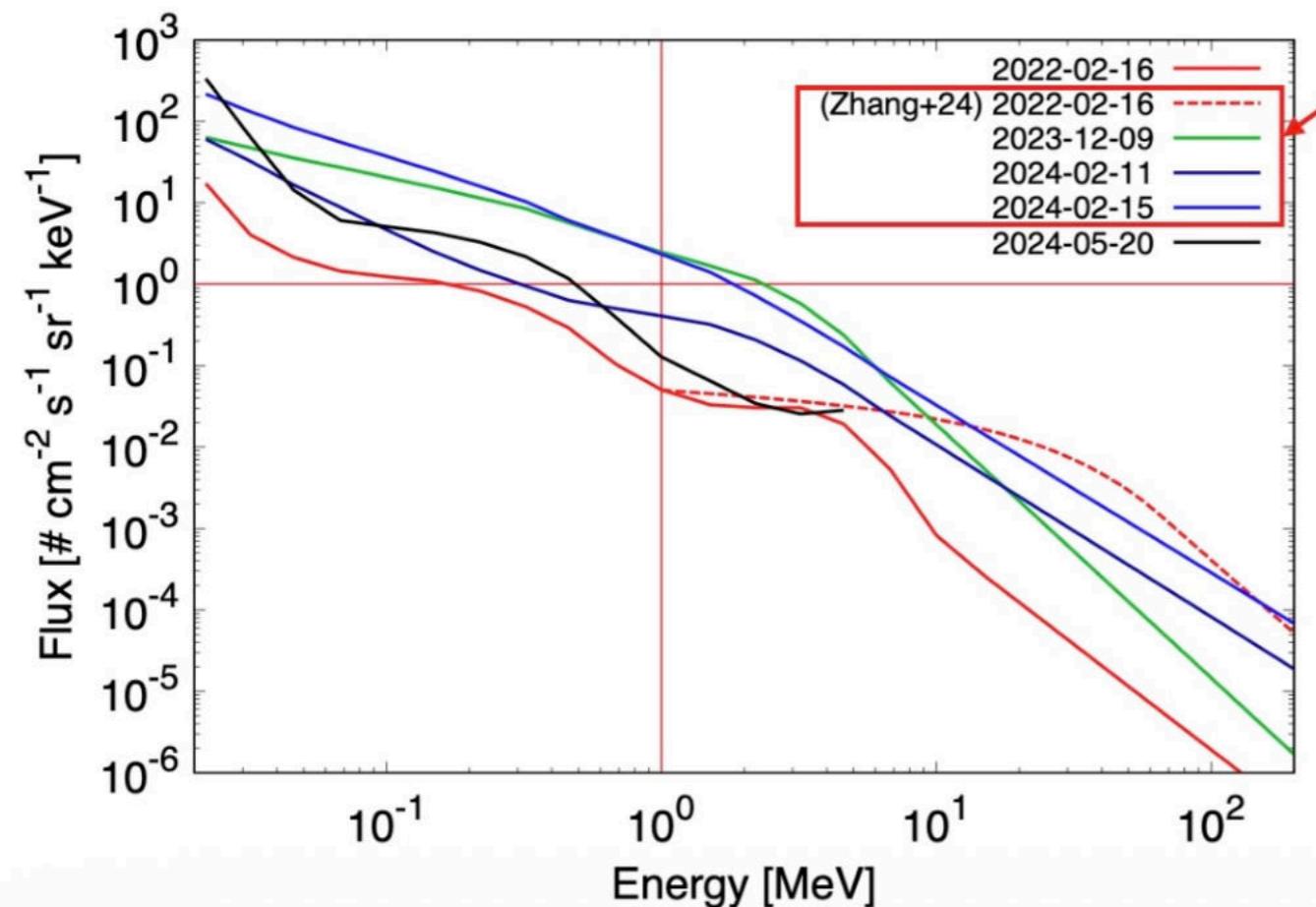
火星初「デリンジャー現象の実証」

- 太陽X線増大に伴って火星昼側で電波吸収が生じることを示唆。
- 日常的に電波吸収が起こりえる。



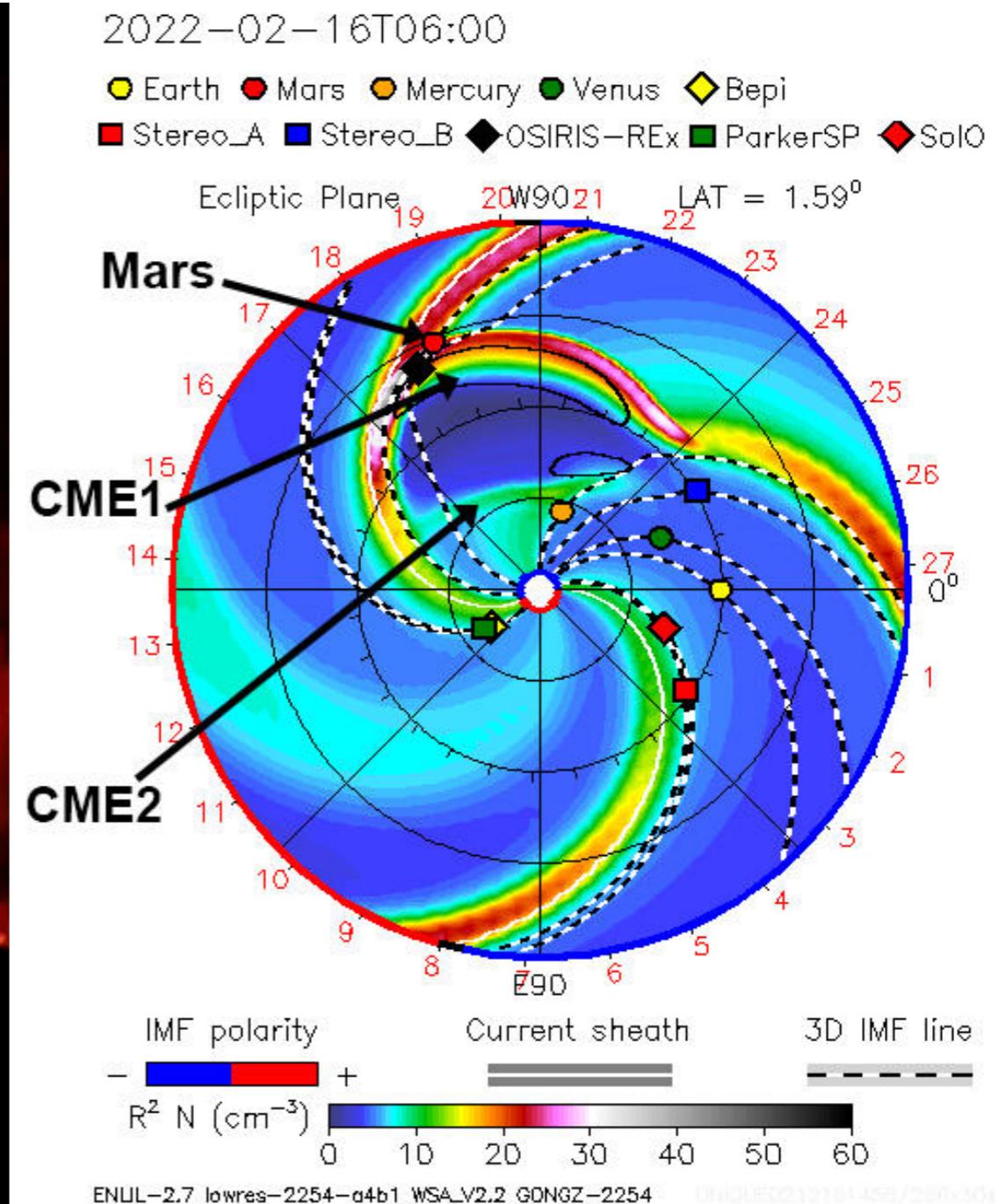
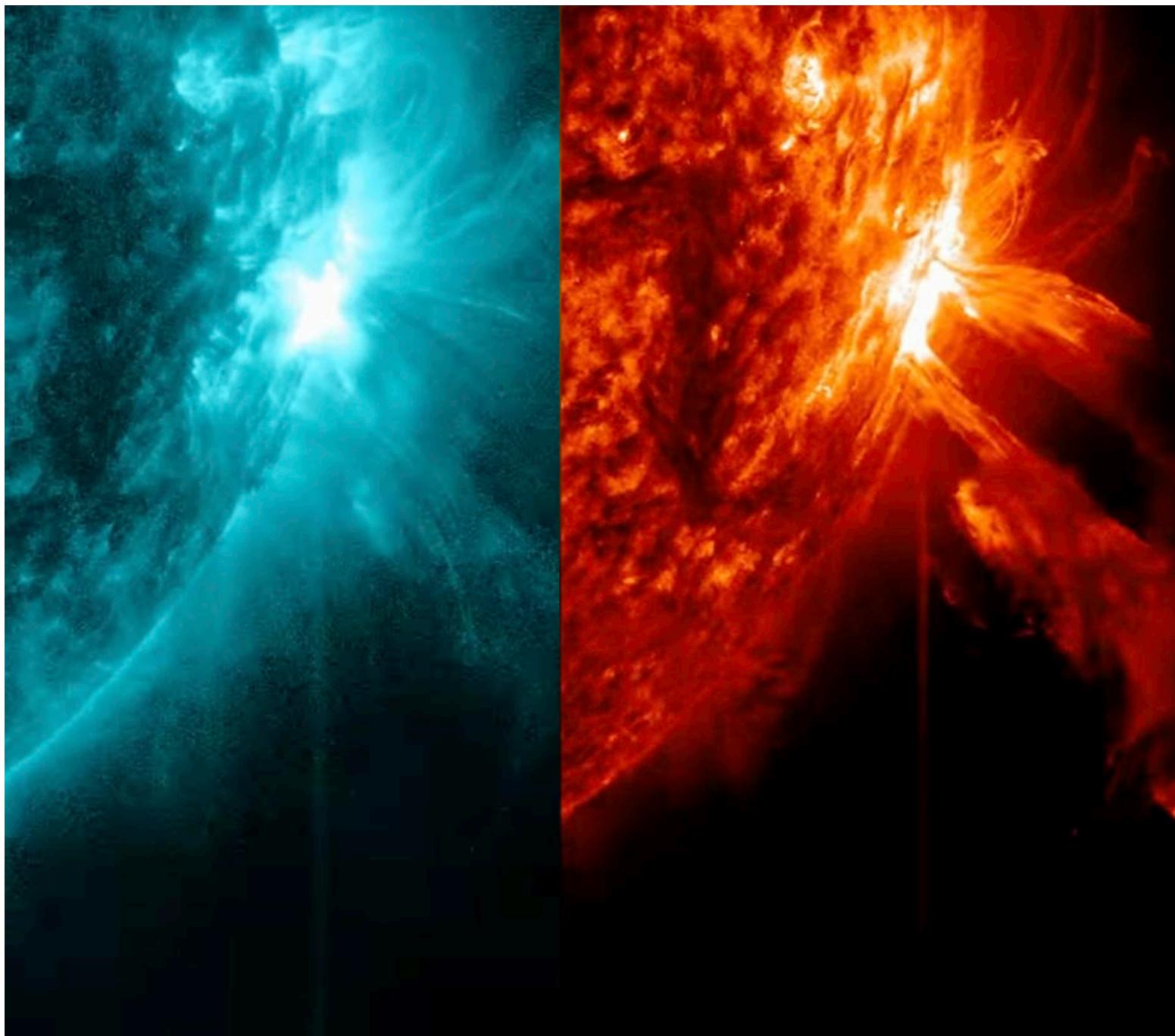
不確定性 「高エネルギー計測の限界」

- 地表面付近に到達可能な太陽高エネルギープロトンスペクトル計測が火星では存在しない。外挿困難のため大きな不確定性が生じる。
- MMX搭載IREMは火星史上初300MeVプロトンを計測予定。



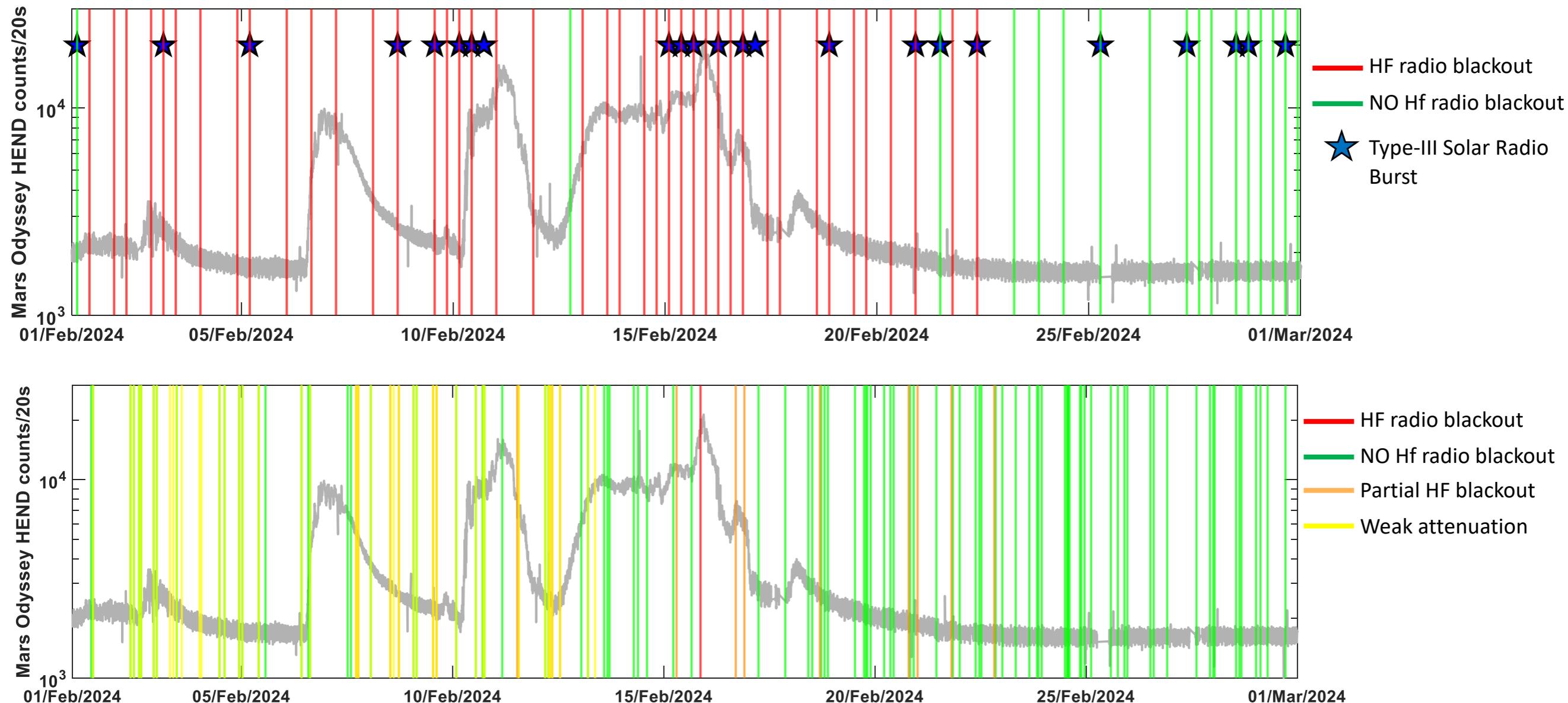
「火星衛星コンステレーション観測」

- 2024年2月Xフレア・太陽高エネルギー粒子イベントを事例に検証



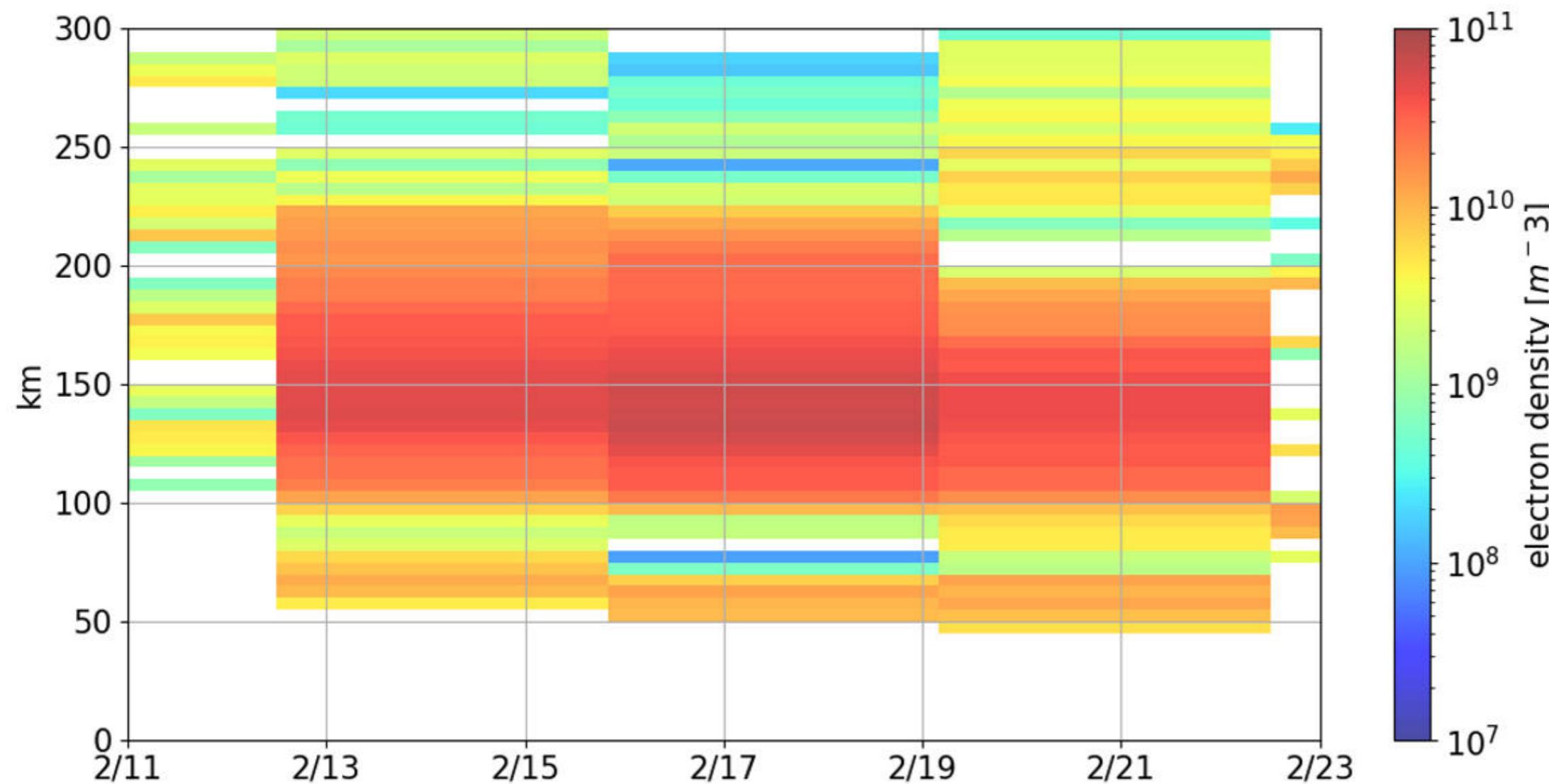
1 「電離圏状態監視と通信障害」

- MEX/MARSIS, MRO/SHARADの2周波数帯で監視
- 1ヶ月を通して通信障害が多発, 16日は深部まで電離



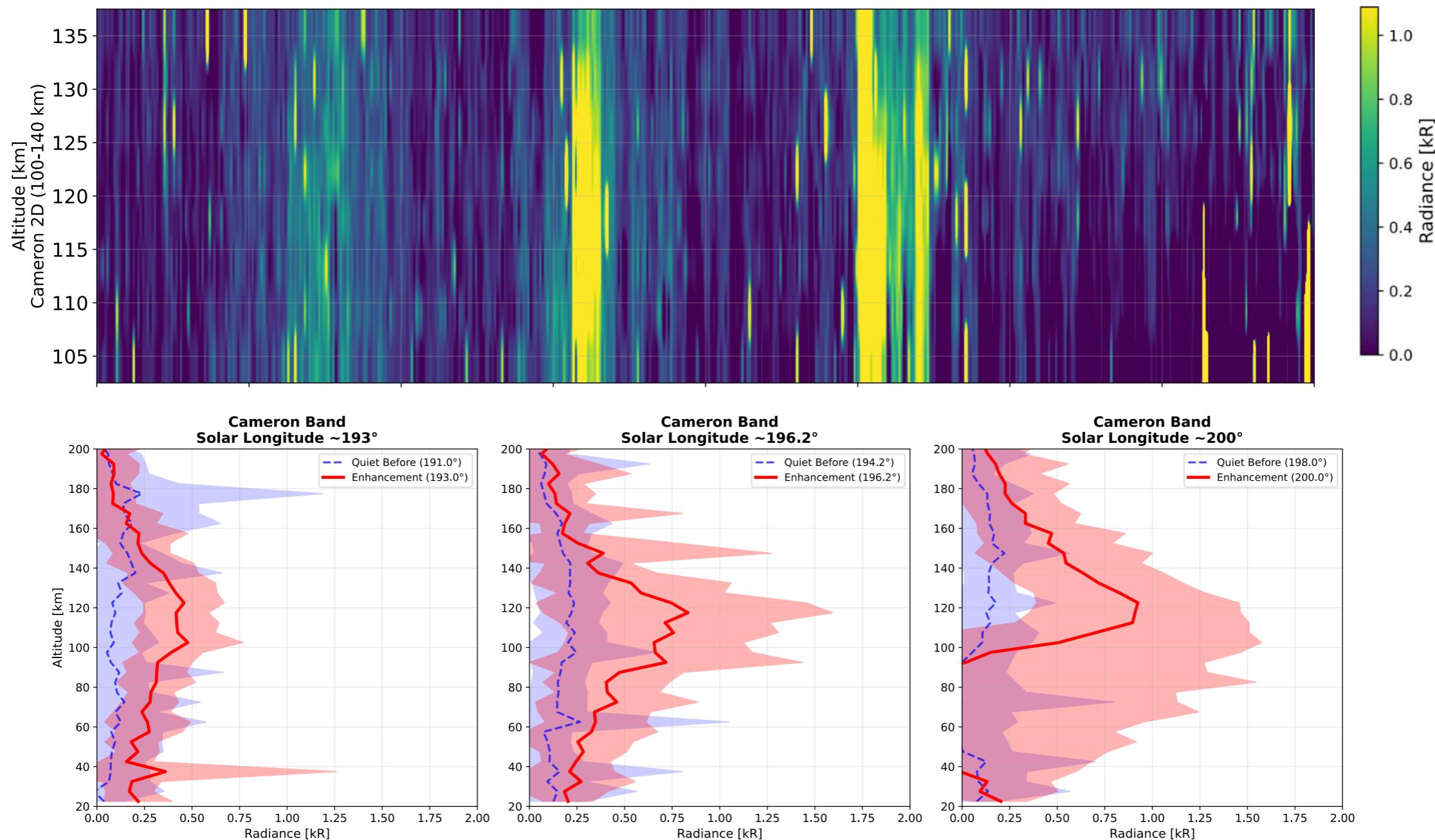
1 「電離圏状態監視と通信障害」

- MAVEN/ROSE掩蔽観測で電子密度高度プロファイルを計測
- 高エネルギー粒子到来ピーク時には高度60km付近に電離層
- 観測との比較により物理モデルを検証



2 「プロトン降り込みとオーロラ」

- オーロラ発光分布(放射線分布)変動
- 観測との比較により物理モデルを検証



成果まとめと今後の課題

- 大目標→オーロラ観測データと物理モデルを突き合わせることで、放射線被曝・通信障害を可視化し、火星宇宙天気ハザードマップをつくる
- 成果→宇宙天気予測に資するモデルの基礎構築
 - 過去データ事例に基づく検証
 - オーロラ(被曝)・電離率(通信障害)の再現を通じて、軌道高度から表層に至る各高度での高エネルギー粒子フラックスを推定
- 実用に向けた課題→膨大な計算リソースと実測とのズレ、実観測計画(M-MATISSE)と紐づいた検討、社会実装への道筋
- データアーカイブサイエンスによる施策→
 - 予報に必要な事前計算データベース化 (e.g. LUT)
 - それを学習したAIモデルアーカイブ解析 (ケースが限られてる場合は地球などのケースも学習)
 - その先には、「太陽爆発から火星到着まで伝搬予測」「ナウキャストに必要な粒子スペクトル計測→オーロラLUT→被曝予測のエッジコンピューティング型予報」

「宇宙天気フローと本研究の役割」

フェーズ	事象	計測	影響
フェーズ1 発生直後～数分	太陽フレア発生 X線・電波到来 デリンジャー現象	太陽X線 太陽電波バースト 電離圏	大気電離→短波通信障害 大気加熱→人工衛星軌道変調 (GPS精度低下)
フェーズ2 数十分～数時間	プロトン現象	太陽プロトン ディフーズオーロラ 電離圏	大気電離→短波通信障害 人工衛星誤作動 放射線被曝
フェーズ3 数時間～数日	コロナ質量放出 (CME)到来	太陽コロナ 太陽風 ディスクリートオーロラ	磁気擾乱