

Discrete Aurora on Mars: Insights Into Their Distribution and Activity From MAVEN/IUVS Observations

N. M. Schneider, Z. Milby, S. K. Jain, J.-C. Gérard, L. Soret, D. A. Brain, T.
Weber, Z. Girazian, J. McFadden, J. Deighan, and B. M. Jakosky
(2021)

<https://doi.org/10.1029/2021JA029428>

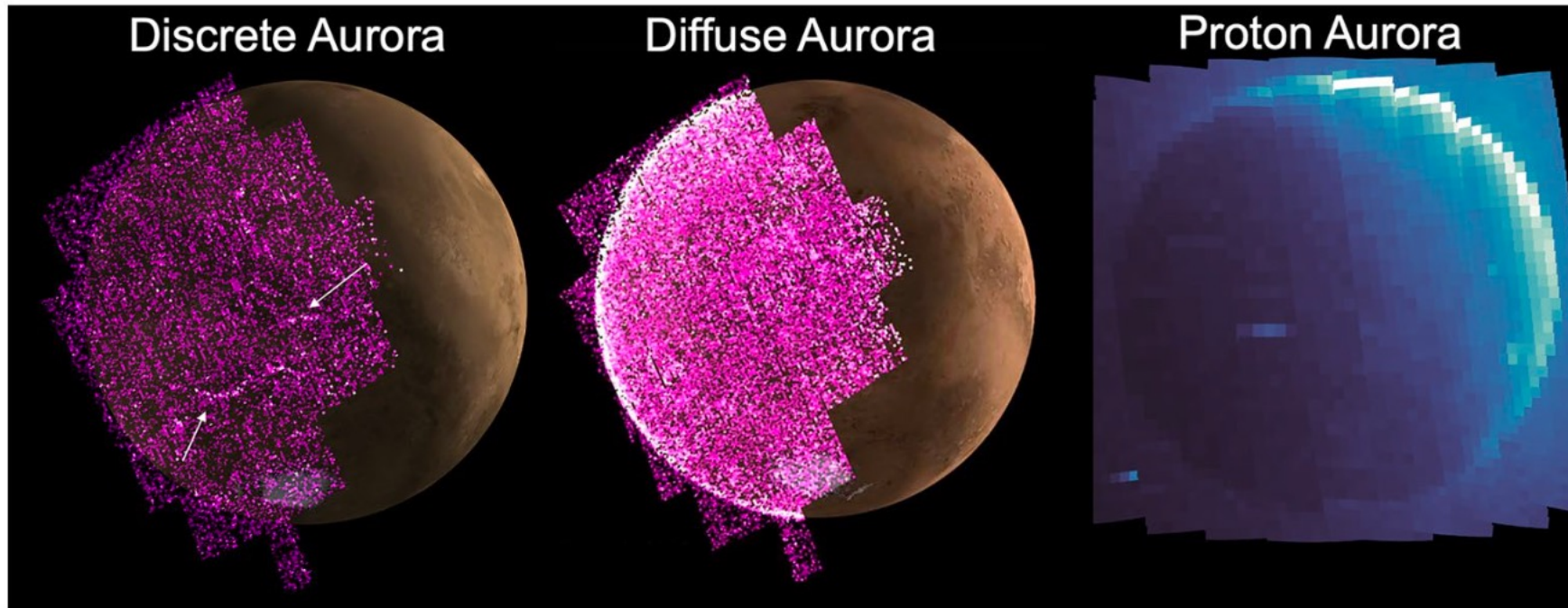
東京大学 M2 沖山 太心

概要

- MAVEN探査機のImaging Ultraviolet Spectrograph (IUUVS)によって、今まで278のディスクリートオーロラ(パッチ状に不定期に起こるオーロラ)が観測されてきた。
- ディスクリートオーロラは、火星残留磁場領域で発生しやすいがそれ以外の場所でも起きることが観測されている。
- オーロライベントは夕方側で発生し、特に惑星間空間磁場がオーロラ発生に適した構造の時に発生しやすい。毎晩数時間続くオーロラが見えると予想される。
- 紫外線オーロラ反応が、将来の探査機や宇宙飛行士にも観測されるかもしれない。

1. イントロ

- 火星には
ディスクリットオーロラ(短時間のパッチ状のオーロラ、地殻磁場に関係)、
ディフューズオーロラ(夜側に広く分布、太陽光エネルギー粒子で発生)、
プロトンオーロラ(火星昼側に分布、太陽風プロトンで発生)
の3種類のオーロラが観測されている。



1. イントロ

ディスクリートオーロラ

- Mars ExpressのSPICAM装置により観測されている。
- CO₂由来の紫外線発光で光る。
(the Cameron bands[190-270 nm], the ultraviolet doublet or UVD[289 nm], the oxygen forbidden emission[297.2 nm])
- 発光は数秒から数十秒続く。再発生率は不明である。
- 電子のエネルギーフラックスの増加とオーロラ発生は対応する。
- ただし、それらの鉛直方向の対応が必ずしも見られるわけではない。磁場が電子の運動に影響を与えている可能性がある。
- 発生場所は地殻磁場が強い場所に関連している。
- シミュレーション計算では、40 – 200 eVまで加速された電子が高度135 km程度までエネルギーを保持して火星に降り込む。
- Mars Expressに加えてMAVENも近年からディスクリートオーロラを観測している。

1. イントロ

ディスクリートオーロラの疑問 (赤文字が本論文で注目)

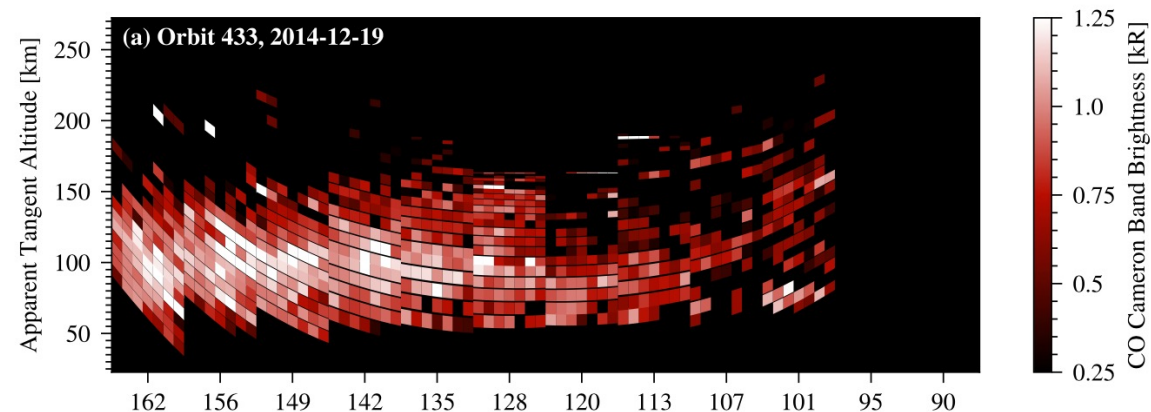
- ディスクリートオーロラがどのように分布しているのか。地殻磁場のない場所でも見えるのか。
- オーロラ発生の頻度はどの程度か。オーロラが頻繁に発生しやすい、繰り返り起こりやすい、長く続くなどの特徴がある地点があるのか。
- オーロラ発光の輝度やその他の特徴から、励起や発光や放射輸送のプロセスを知ることができるか。
- オーロラ発光を引き起こす粒子降り込みを起こさせる状況はどのようなものか。ローカルタイムや惑星間空間磁場などの磁場構造が影響を与えるのか。

2.観測と解析手法

- MAVEN探査機の近点でのリムスキャンデータを使用 (下の図がその結果の1例)

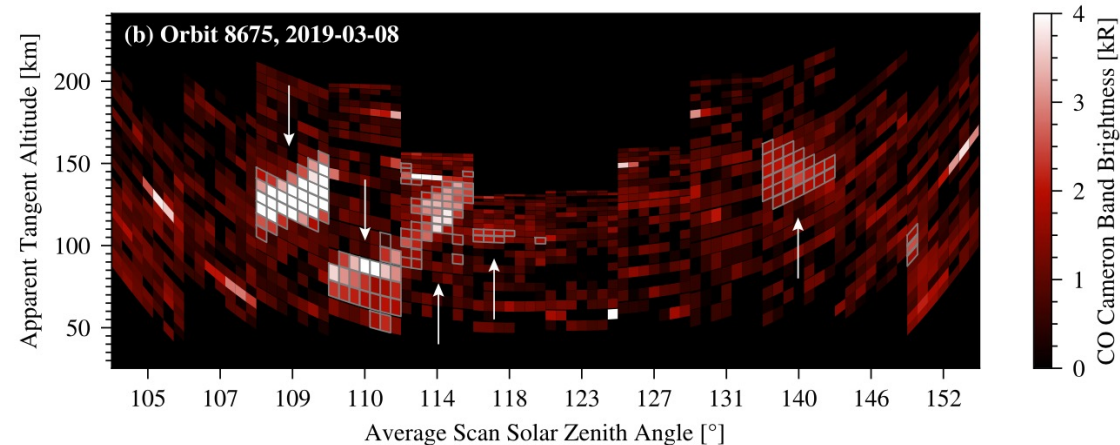
ディフューズオーロラ

- ディフューズオーロラ
 - (水平方向に)数千 kmに及び空間的に一様で、連続的である。
 - 高度100 kmかそれより低高度で発光



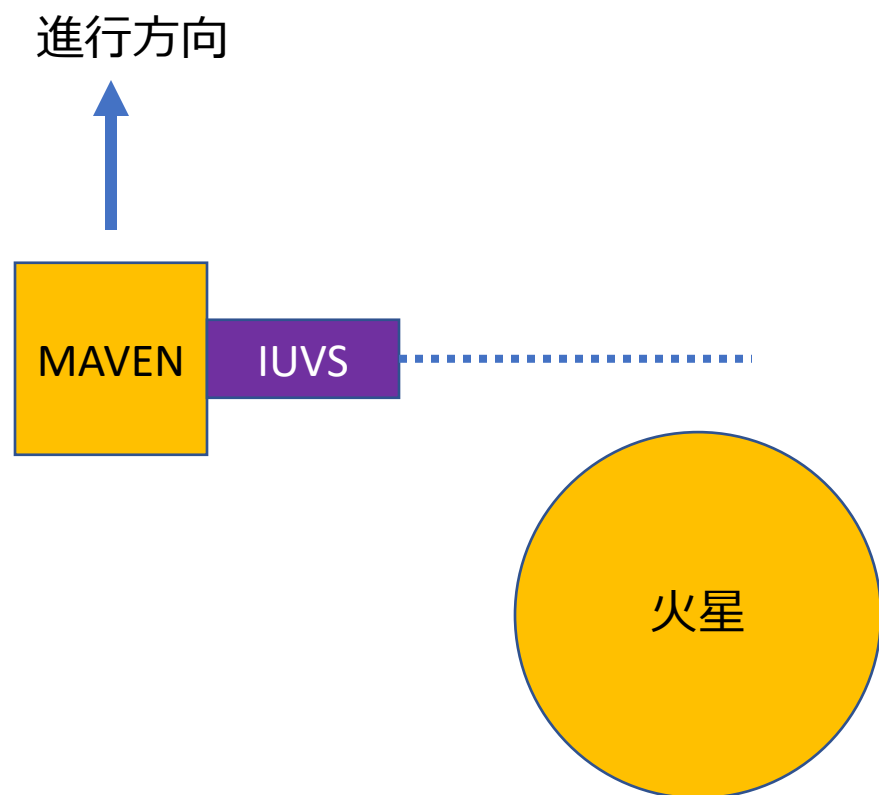
ディスクリートオーロラ

- ディスクリートオーロラ
 - 不連続、非一様
 - 高度は、オーロラがリムに来ている保証がないため、最低値になっている。



2.観測と解析手法

IUVSリムスキャン観測



- IUVSを高度~50 kmから~200 km程度まで動かして高度方向のデータを取得。
- 1回の近点通過の22分間に、12回リムスキャンを行える。(ミッション後半では12から14回に増えた)
- Level 1B dataの“periapse” version 13を使用した。
- オーロラ発光とNOによるナイトグローと太陽の連続光とを区別するために、a multilinear regression technique (MLR) という手法(Stevens et al., 2015)を用いた。
- Schneider et al. (2020)の恒星キャリブレーションを用いて単位を切るレイリーにした。

2.観測と解析手法

オーロラ検出方法(3段階)

1. 昼側と明暗境界から15度までのデータを除いた夜側データセットを用意する。そのために、宇宙線によるデータ欠損と高度データが足りないものと過去の太陽光エネルギー粒子イベントをフィルターにかけ取り除いた。
2. CO Cameron Bandの放射が統計的に優位かどうか調べる。信号-ノイズ比がCO Cameron Band >3 、CO₂⁺ UVD >4 のデータに対して、CO Cameron Bandの判定係数であるPearson R correlation coefficients を計算して、3ピクセルより多く $R > 0.55$ だったデータを用いる。
3. 目で見て最終チェックを行う。

データの詳しい表はFAIR data repositoryにある

2.観測と解析手法

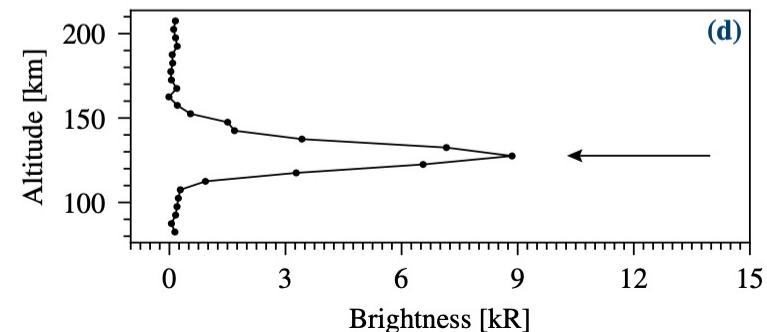
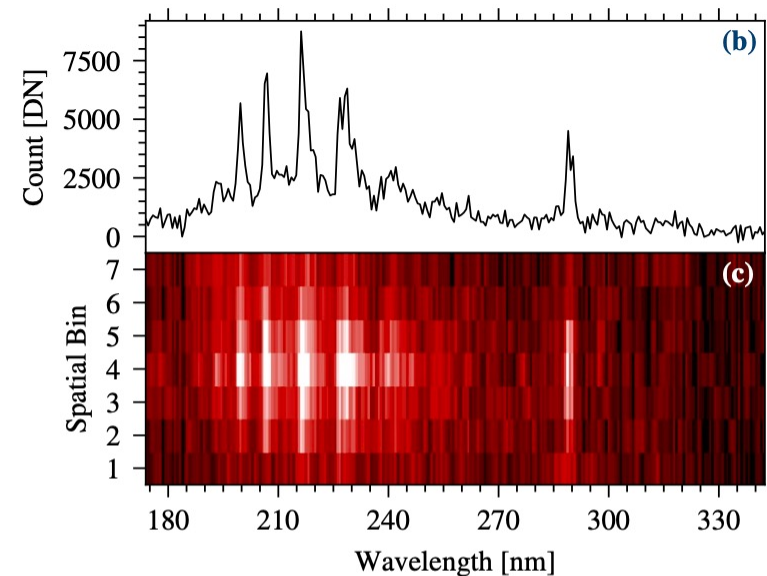
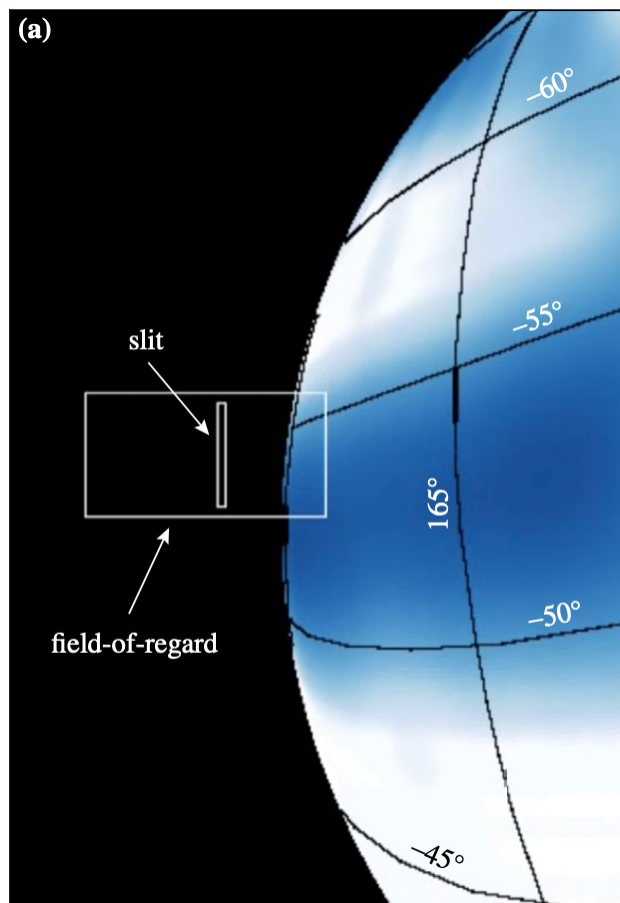
完成したデータの例

(a)観測場所(青い場所が磁力線が開いている可能性が高い場所)

(b)スリット中で積分されたスペクトル

(c)空間分解されたスペクトル(スリット中央で発光のピークが見られる)

(d) Cameron Band 放射の巢直分布

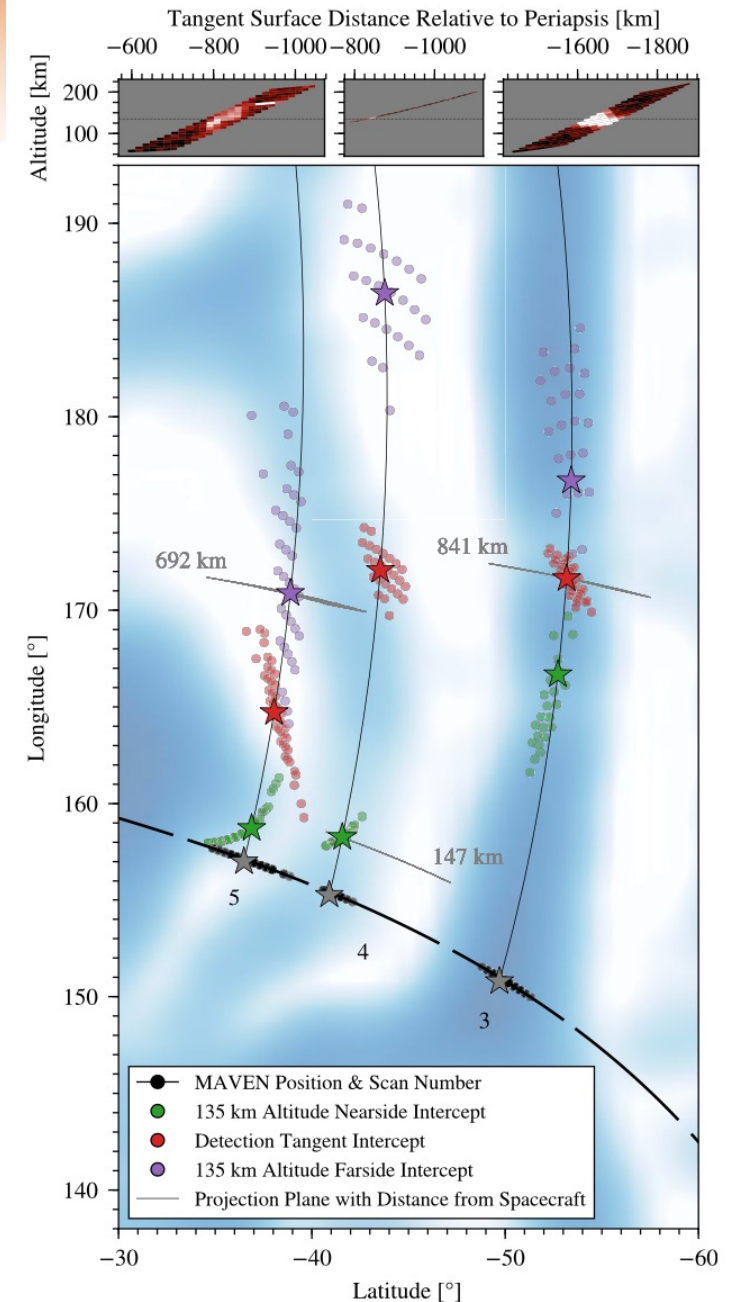


3.オーロライベントの場所と形態

- オーロラ検出の後には、地理的、空間と時間的な情報を調べる。
- パッチ状のディフューズオーロラの場所と形状の決定を難しくする要因
 - 探査機が $\sim 5 \text{ km/s}$ の高速で動き、観測スリットが長方形から傾いた形になる。
 - 探査機の高度によりリムからの距離が変わるため、観測ごとに空間スケールが異なる。
 - パッチ状のオーロラがリム状にいるとは限らない。(視線状の奥や手前にいるかもしれない)

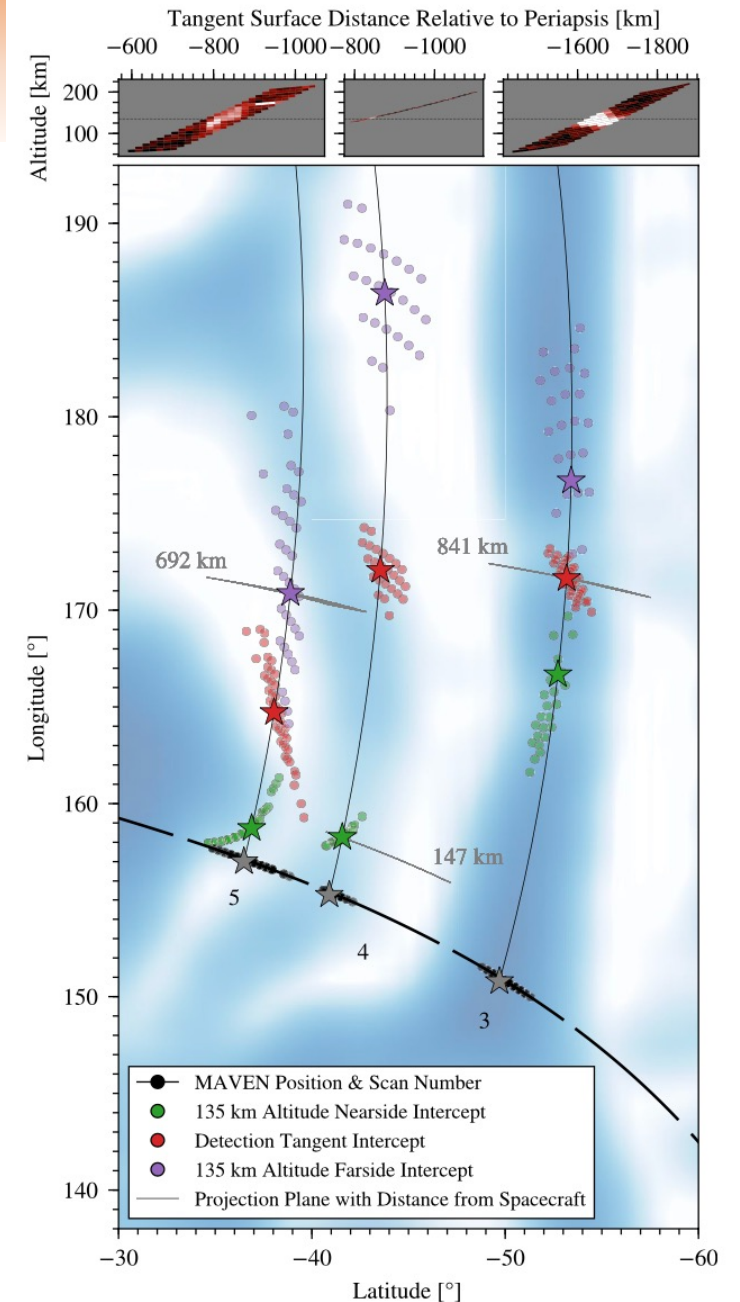
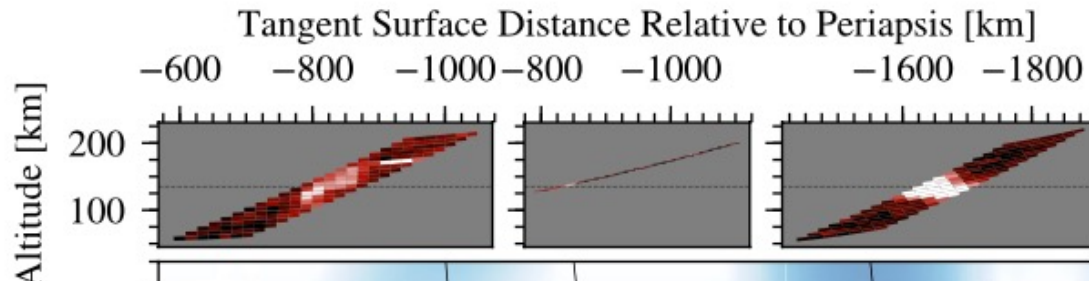
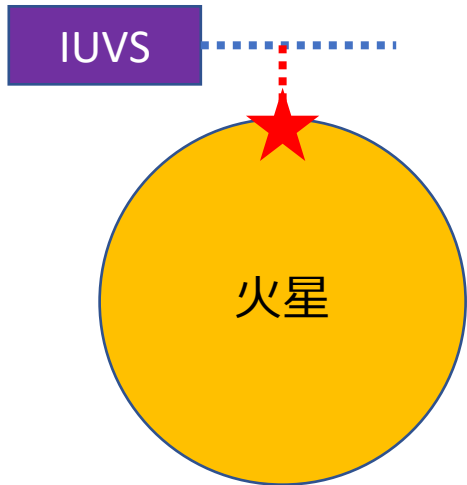
3.オーロライベントの場所と形態

- 軌道8675でケーススタディを行った。
- 下の図の背景マップは青いほど磁力線が閉じている。青い場所でオーロラが発生しているため、“磁場の谷間”でオーロラが観測されている。
- 黒線が探査機の地上から見た軌跡、黒星がオーロラ観測点、数字がスキャン番号を示す。
- 赤点がsub-tangent地点(リムの真上)で発光が発生していた場合の場所、緑点がリムの手前、紫点がリムの奥で発光していた場合の場所を表す。星は同じ色のドットの重心を表す。
- 上の図は、下の図の星の地点を通る灰色線の面上でのオーロラ発光の高度分布を表す。星は開いた磁場上に来るように選んでいる。これから、オーロラ発光高度はおよそ135 kmだと思われる。(スキャン3:赤星、4:緑星、5:紫星)
観測によって、緑点、赤点、紫点が近く地点がおよそ定まる場合と、それらが離れていて地点の誤差が大きい場合がある。



3.オーロライベントの場所と形態

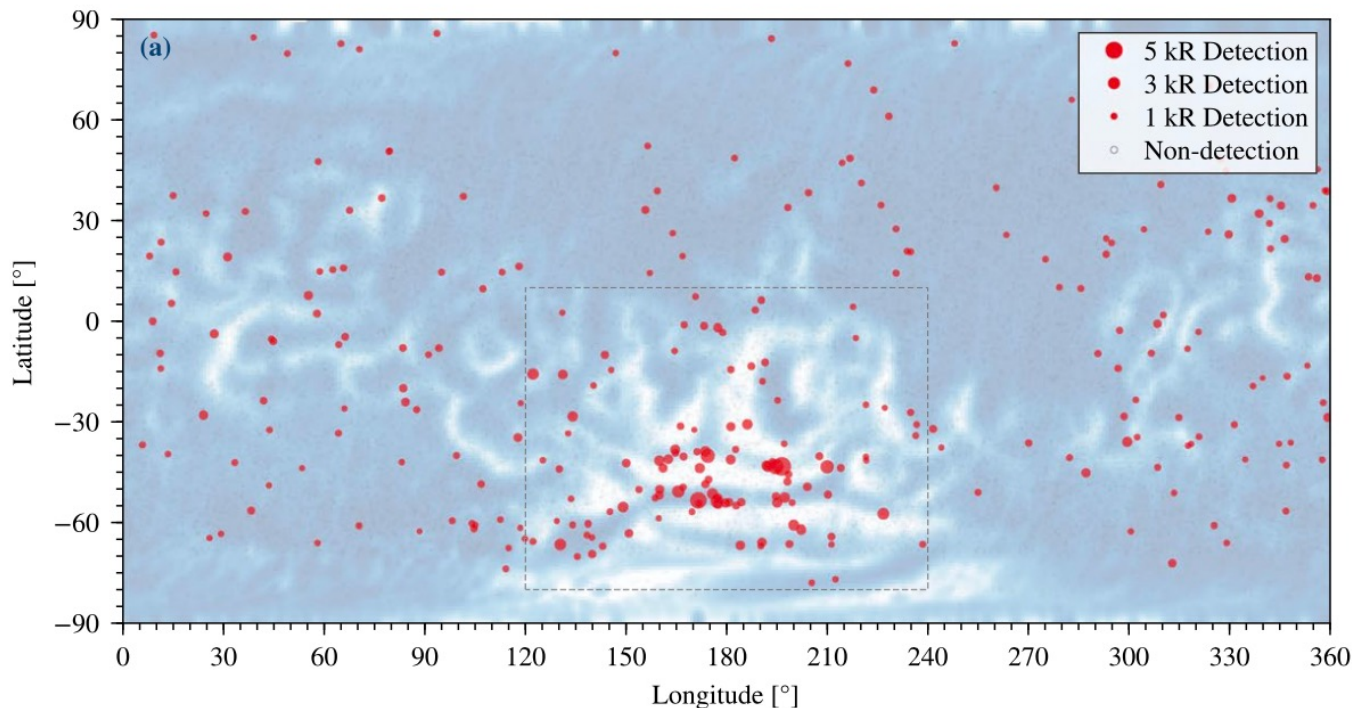
- 近い地点だと発光の高度分布は細くなり、発光のある高度でのスリット全てが発光を示す白になる。遠いと発光高度分布が太くなり、スリットに発光がない黒色が現れる。
- この特徴と、磁場の開いた場所でオーロラが起きるという制約から、発光場所を絞れる可能性があるが、この論文ではそれは行わない。
- この研究では、以後subtangent地点(赤星)の地点をオーロラ発光発生地点とする。



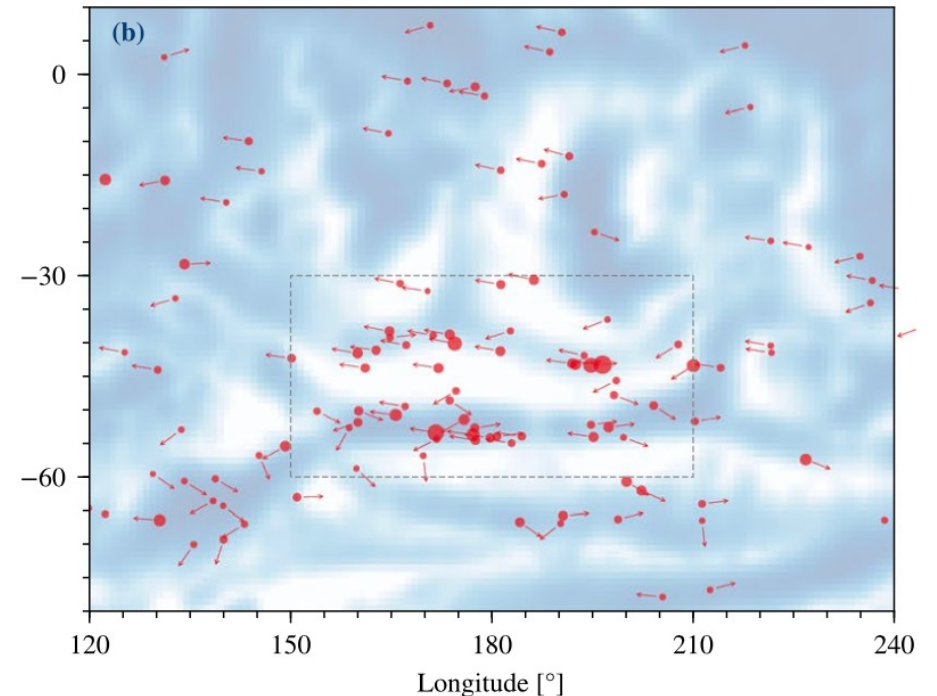
4.観測結果：オーロライベントの地理分布、頻度、持続時間

- 検出率は~0.834 %で33,319スキャン中で278回検出した。
- 地殻磁場のある場所で頻繁に最も明るいオーロラが発生している。以下の点が予想外だった。
 - オーロラ発生地点の不確定性は、グローバルスケールではあまり見えない。
 - 背景マップの磁場は3 a.m.の電子のデータをもとに決められ、磁場は地方時で変化する可能性があるが、観測時間が異なるオーロラとよく対応している。
- 地殻磁場の弱い場所や地殻磁場のほとんどない場所でもオーロラは発生している。ほとんど磁場のない場所については、地図の書き方で距離が拡大して見えているためである可能性がある。

CO Cameron Band の発光地点を示す。



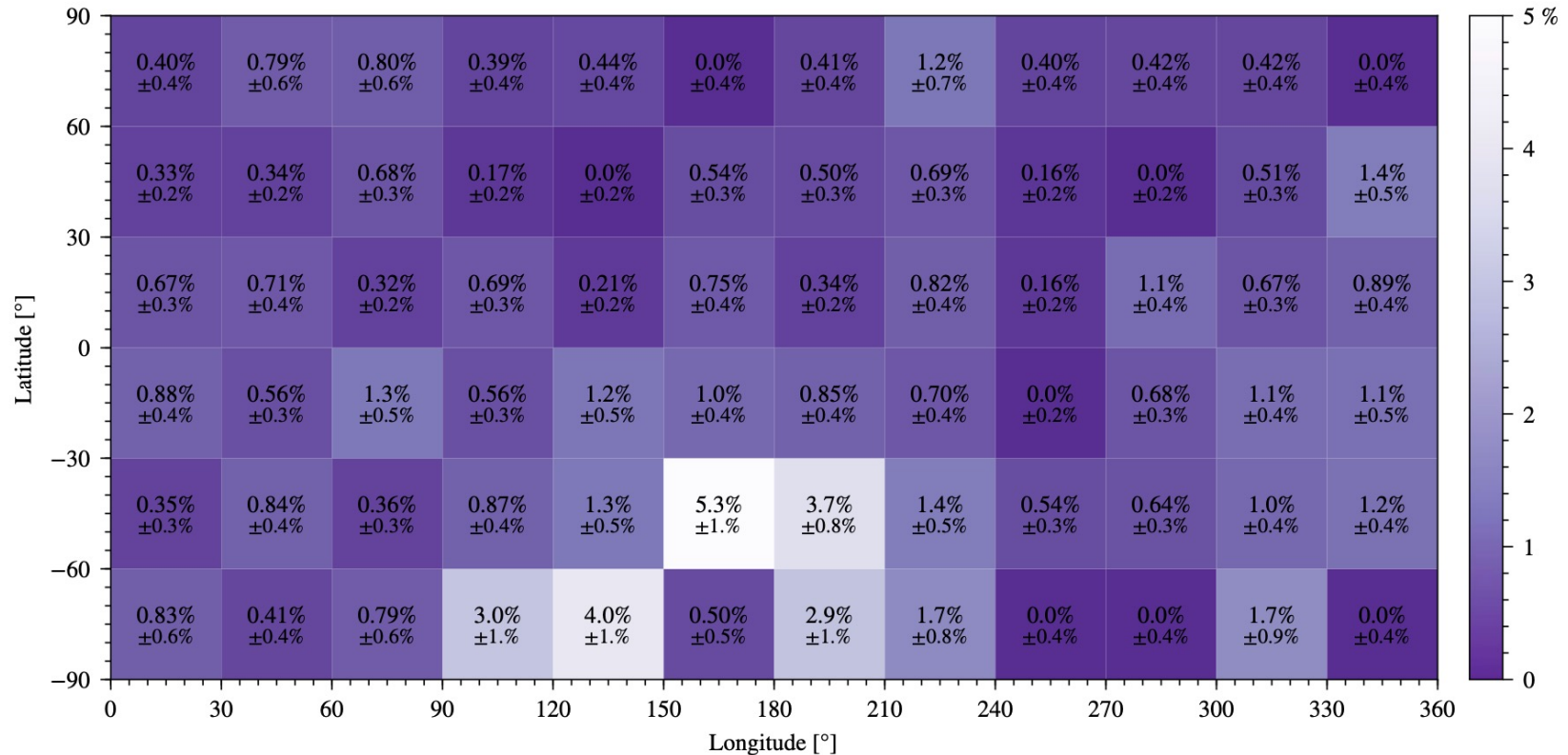
矢印は観測点から探査機への向きを表す。
向きは西向きと東向きに偏っている。



4.観測結果：オーロライベントの地理分布、頻度、持続時間

- 下図はオーロラの発生率を $30^\circ \times 30^\circ$ のビンに対して求めた結果を示す。
- 地殻磁場の強い場所でオーロラが発生しやすいことが確認できる。
- 地殻磁場の特に強い南半球の”Sailboat”と呼ばれる地点のみに着目すると、オーロラ発生に好ましい磁場配置の場所を見るとほぼ必ずオーロラが発生しているかもしれない。

- 地殻磁場の弱い、もしくははない場所でのオーロラは、クラスターになっていなかったり直線的になっていないため、繰り返し発生しているわけではなさそうである。

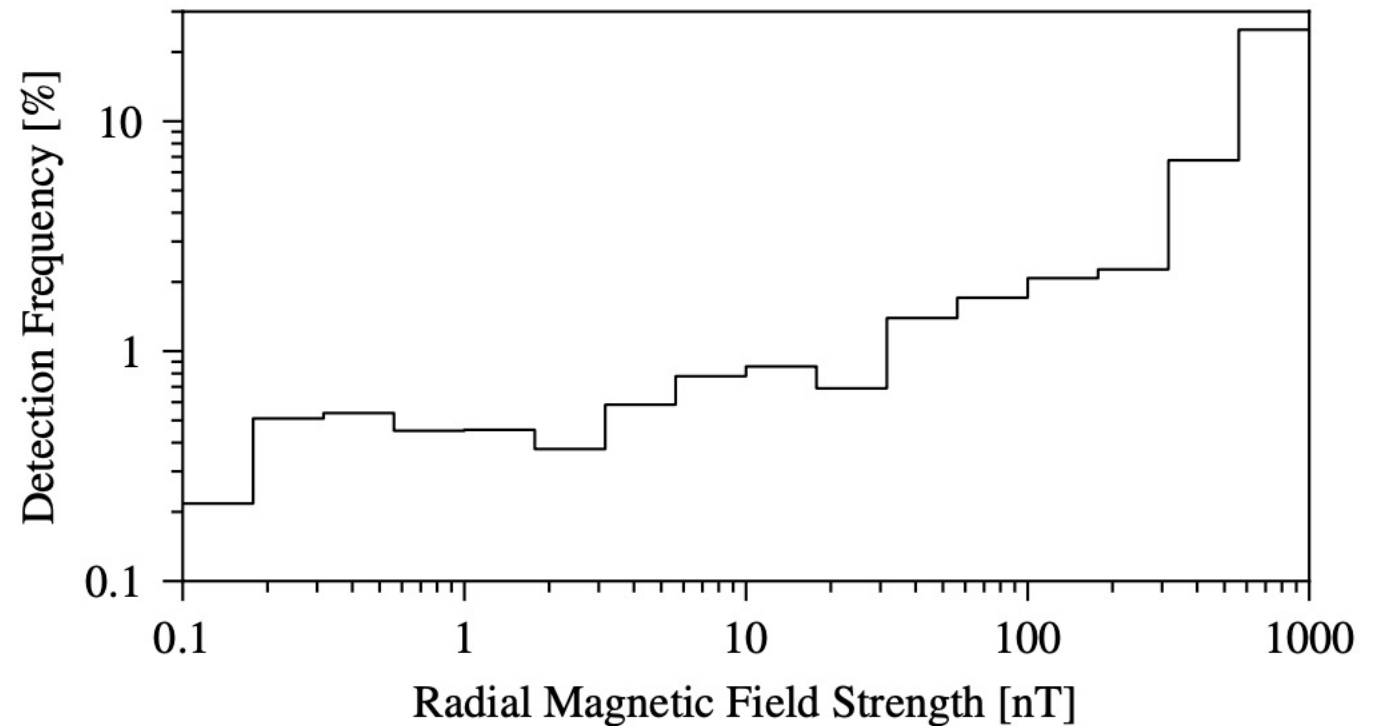


4.観測結果：オーロライベントの地理分布、頻度、持続時間

- MAVENのIUVSによるオーロラ発生の持続時間の見積りでの最低値は、数十秒程度である。
- 軌道8615-8693の軌道で地殻磁場の強い場所の観測では、80%で繰り返しオーロラ発光が検出された。このことから毎晩数時間オーロラが見えると思われる。
- SPICAMのディスクリットオーロラのナディア観測でオーロラは繰り返し観測されないことと整合するには、オーロラが”磁場の谷間”を全て埋めるように光っているのではなく、小さいパッチ状のオーロラが”磁場の谷間”を動いていると考えるとよい。

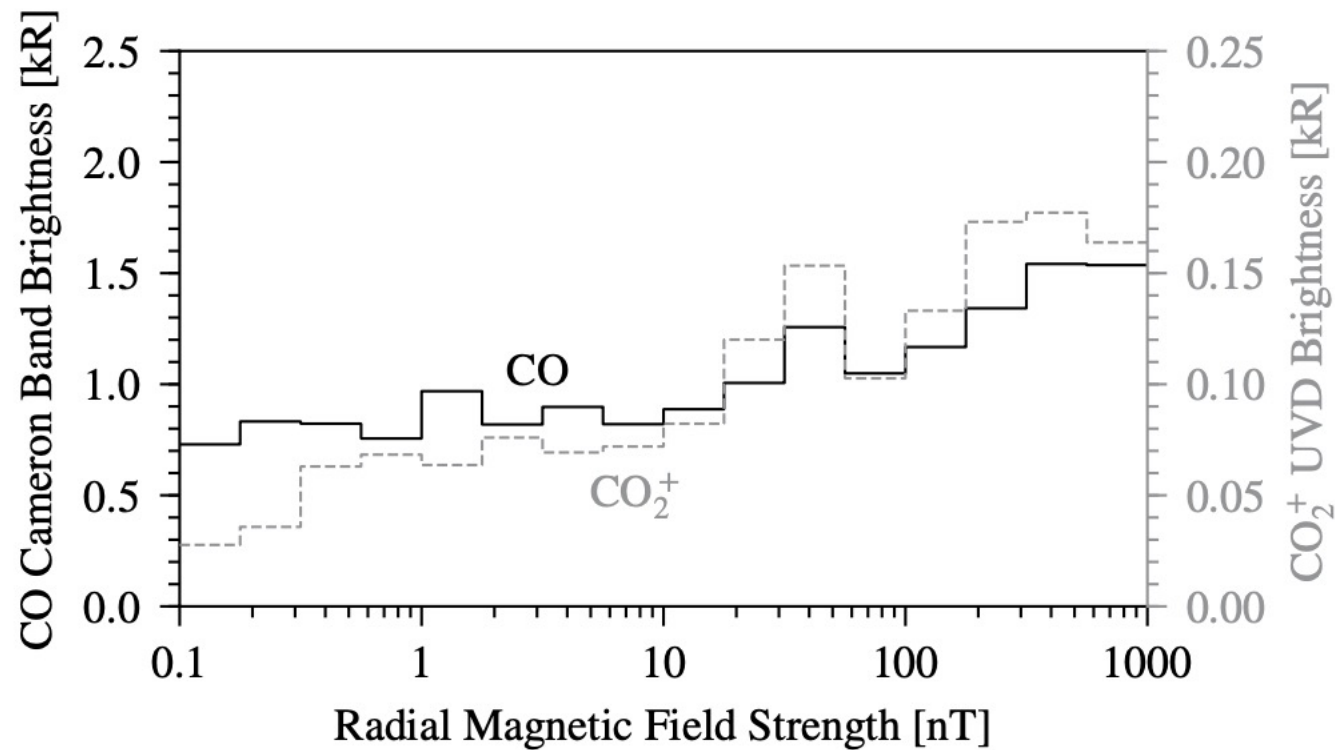
4. 観測結果：地殻磁場強度との関係

- MAVEN探査機で得た高度250 km以下の動径方向の磁場の強さをを用いた (Weber, 2020)。
- 最も磁場の強いビンでは、平均より40倍発オーロラ生率が高い。ただし、このような場所は火星で~0.08%でほとんどない。
- オーロラ発生率が高い傾向は、磁場の強さが30 nTより強い場合でも見られる。これは、火星の~11%程度を占める。



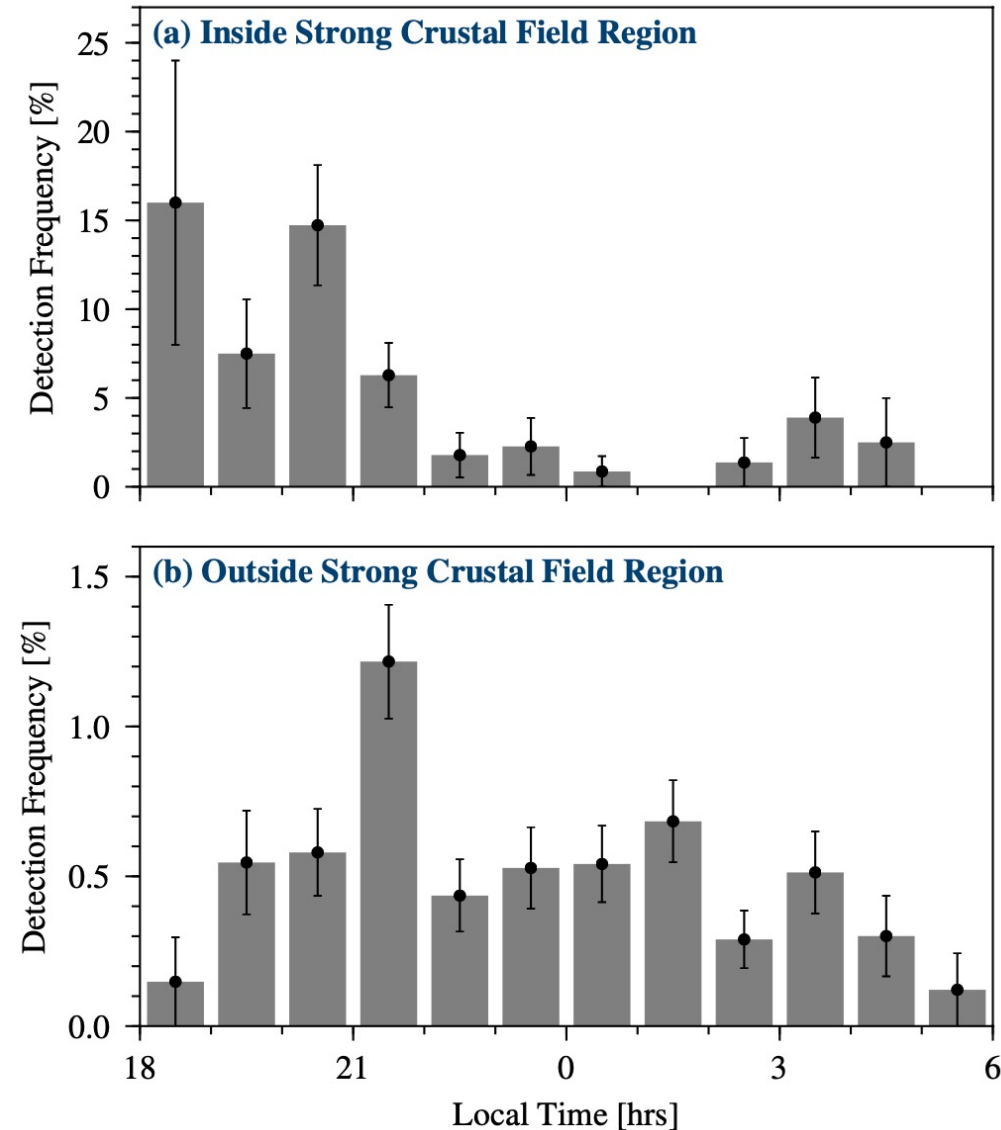
4.観測結果：地殻磁場強度との関係

- 地殻磁場が30 nTを超える場合にオーロラの輝度が大きくなる。



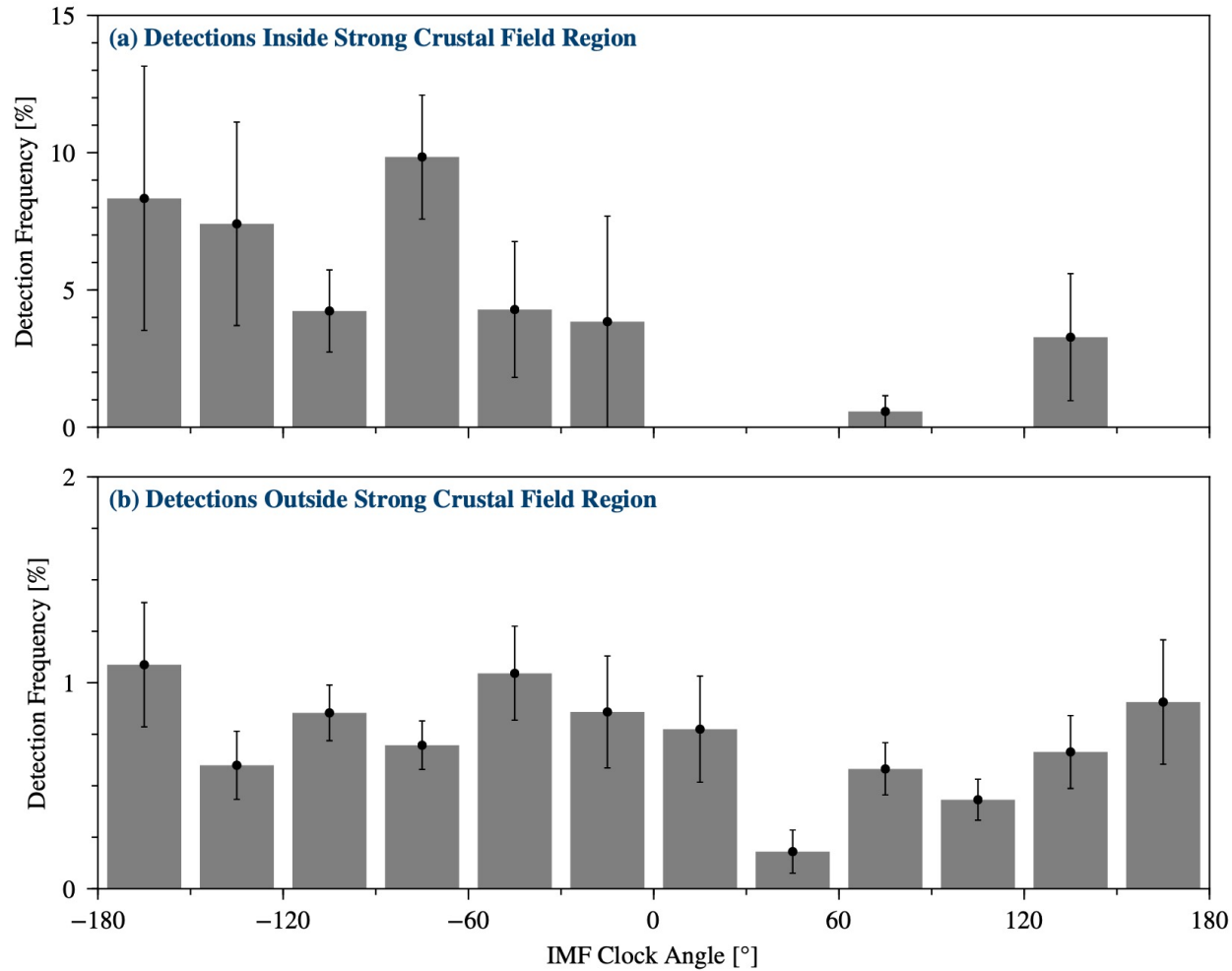
4.観測結果：地方時と惑星間空間磁場の角度の影響

- 磁場の強い領域は図5bで囲まれている場所を示す。
- 磁場の強い領域では、22時までにオーロラが発生しやすい。この発生率は、磁場構造やスキヤンのタイミングを考慮していないため最低値である。
- 磁場の強い領域の外では、晩の発生率が高いが、それ以外の地方時でも均一な発生率が見られる。



4.観測結果：地方時と惑星間空間磁場の角度の影響

- IMF Clock AngleはMAVEN探査機が軌道遠点で測定したデータの平均を用いる。また、オーロラ検出から5時間以内のデータを用いる。
- 磁場が強い領域内では、クロックアングルが負の時にオーロラが発生する。
- 磁場が強い領域外では、クロックアングルが負の場合に僅かに発生率が上がるのみで大きな違いがない。
- まとめてみると、オーロラは夕方クロックアングルが負のIMFの時に発生しやすい。



5.結論と議論：ディスクリートオーロラ現象への視点の変化

- MAVEN/IUVSの観測でMEX/SPICAMの観測結果を確かめ、補強できた。また、ディスクリートオーロラと地殻磁場の関係を調べるデータを幅広く取得した。

新たな知見

- ディスクリートオーロラは地殻磁場が弱い場所も含めた全球で見られる。
- 地殻磁場の強い場所で適切なIMF状態なら、オーロラは毎晩見られ、数時間持続する。

5.結論と議論：ディスクリートオーロラ発生原因の洞察

- 火星の地殻磁場が強い場所では、地球の磁力線上に平行ポテンシャルができて電子が加速されるというメカニズムと同じ方法でオーロラが発生しているかもしれない。実際、電子加速(Brain, Halekas, et al., 2006; Lundin et al., 2006; Xu et al., 2020)やイオン加速(Lundin et al., 2006)は観測されている。
- オーロラ発光はIMF(惑星間空間磁場)のクロックアングルの影響を受ける。これから以下の説を予測した。
- IMFと地殻磁場の向きが逆になる時に、境界で磁場に垂直な強い電流が発生し、リコネクションが起こる。リコネクションによって開いた地殻磁場の磁力線が夜側に回転していくと、電離圏のもとになる磁気圏尾部プラズマが減る。これにより、磁場に垂直な電流が維持できなくなりリコネクションが起こり、もとの閉じた磁力線に戻る。これにより、夕方後にオーロラが発生しやすいことを説明できる。

5.結論と議論：ディスクリートオーロラ発生原因の洞察

- リコネクションは、他の地殻磁場のフラックスチューブとのフラックスチューブの交換をおこす。これにより、渦流が発生し、これに伴い電場と磁場に沿った電流(FACs)が発生する。FACsは、中性大気と荷電粒子の衝突で発生するPedersen 電流による抵抗で減損する。また、フラックスチューブの交換により得ることのできる自由エネルギーは、磁場が乱されていない時のフラックスチューブの状態に戻ることによって減少する。
- FACsの維持には、磁場に平行な電場が必要になる。特に、地球の場合は電離圏と磁気圏の境界が大きな電場が必要で、数kVやそれ以上の電場が必要になる。地球では、この時、電子スペクトルに逆V型の形状が現れる。火星でも逆V型のスペクトルは観測されている(Xu et al., 2020)。

5.結論と議論：ディスクリートオーロラ発生原因の洞察

この仮説の検証のためにUV観測から起こる疑問

- オーロラ発生頻度と強度が地殻磁場の強さに依存する。これが地球型オーロラ発生メカニズムに対応するのかがわからない。
- 地殻磁場から離れた場所でもオーロラが発生する。これを地球型オーロラで説明できるのかわからない。地殻磁場で加速された電子が、地表付近の複雑な磁場構造で遠くに運ばれているかもしれない。
- ディスクリートオーロラは数時間という長時間の時間スケールで発光できるのかという疑問もある。

5.結論と議論：将来の展望

- ピクセル数を大幅に増やすことで、自動化された統計的検出アルゴリズムを改善できる。
- オーロラを引き起こす要因(地方時、IMFクロックアングル、Br)とオーロラが検出できない場合との関係を調べると、ディフューズオーロラの発生メカニズムの解明につながるかもしれない。
- 個々のイベントを詳しく見ると、ディフューズオーロラと磁場の関係や実際に見た場所の影響を調べられ、電子の降り込みのヒントが得られるかもしれない。
- SWEAで観測された電子スペクトルで降り込み電子の制限を与える。
- モデル計算により、火星の磁場と荷電粒子の相互作用を理解する。
- the Emirates Mars Mission のEMUS紫外線装置と共同研究する。