

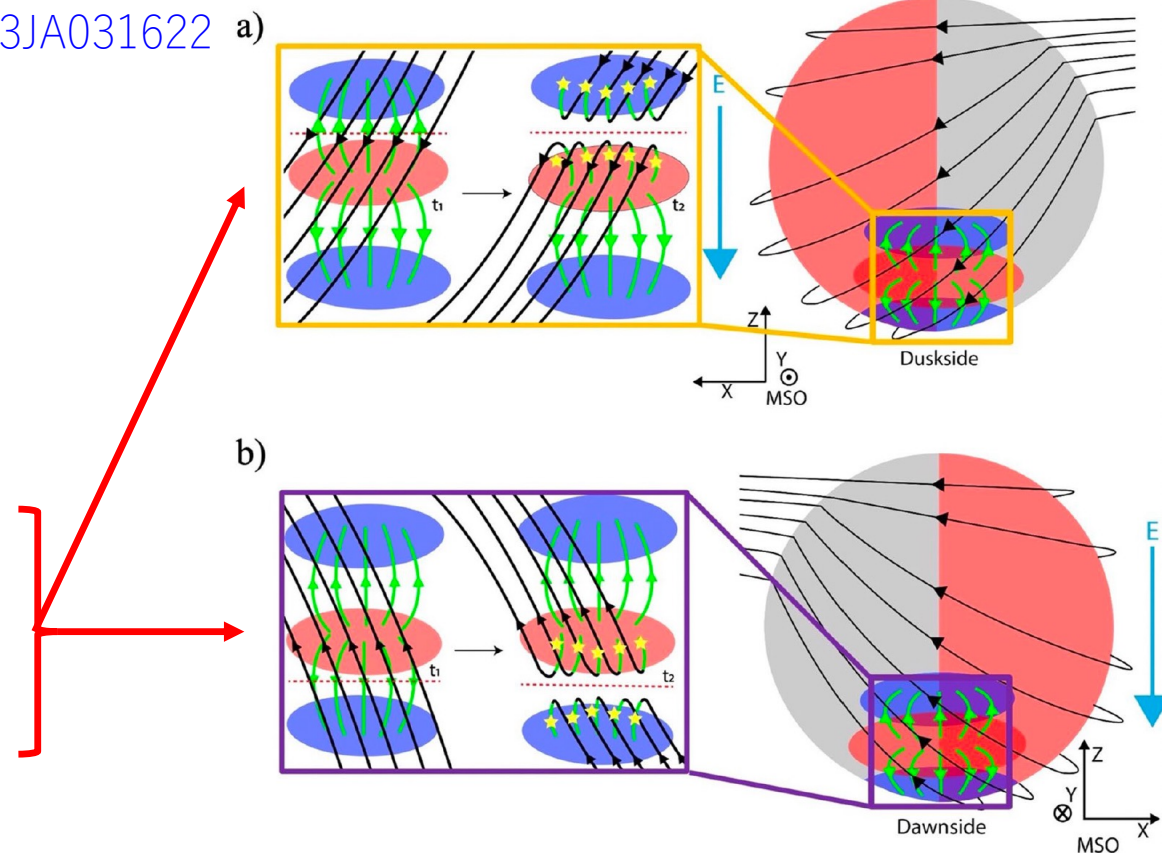
C. F. Bowers et al. (2023)  
Evidence for Magnetic Reconnection  
as the Precursor to Discrete Aurora at Mars

Journal of Geophysical Research: SpacePhysics,  
128,e2023JA031622. <https://doi.org/10.1029/2023JA031622>

**Key Points:**

- Discrete aurora over two regions of crustal fields at Mars occur under specific draped magnetic field conditions
- Of the 49 discrete aurora analyzed, 42 (86%) occur under conditions that favor anti-parallel magnetic reconnection
- Reconnection plays a role in discrete aurora onset, explaining trends in auroral detections including local time and upstream conditions

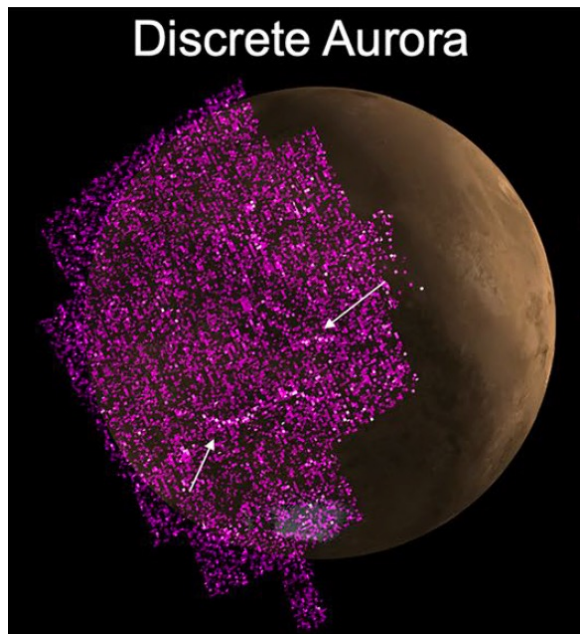
第94回火星勉強会  
京都大学 M1 竹内直之



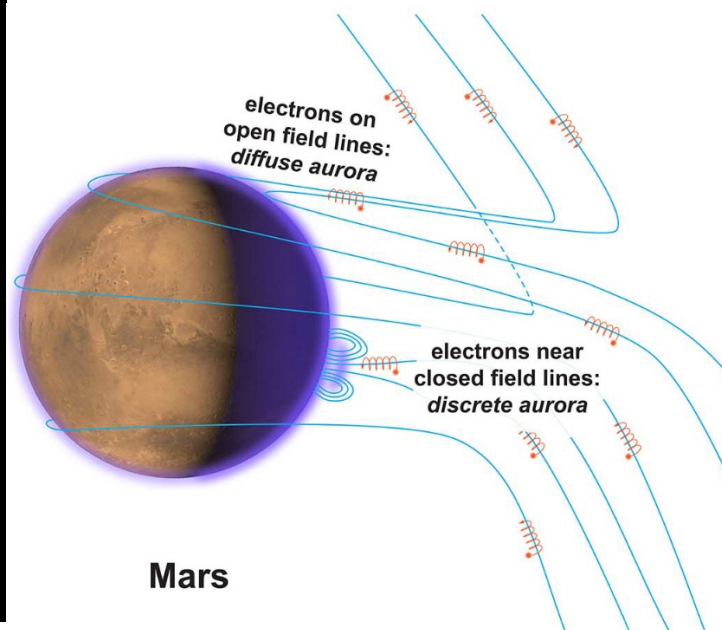
**Abstract** Discrete aurora at Mars are characterized as localized, short-lasting ultraviolet emissions on the nightside. They are caused by the precipitation of accelerated electron along open magnetic field lines and their collision with the Martian atmosphere. Discrete auroral emissions detected by the Imaging Ultraviolet Spectrograph (IUVS) instrument onboard the Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) spacecraft occur most frequently over the strongest crustal magnetic anomalies at Mars and under particular local time and upstream interplanetary magnetic field (IMF) conditions. These trends suggest that the onset of discrete aurora is controlled by the processes that govern the interaction between the draped IMF and the crustal magnetic anomalies. Here, we analyze MAVEN magnetometer measurements over regions of strong crustal fields during 49 discrete auroral events observed by IUVS. Our results indicate that the draped IMF orientations during each discrete auroral event show a clear tendency to be anti-parallel to the underlying crustal anomaly magnetic fields near the location of the emission onset. This suggests that magnetic reconnection, a process that favors anti-parallel magnetic field regimes, between the crustal fields and the draped IMF plays a role in discrete aurora formation. Of the 49 discrete auroral events analyzed, 42 (86%) occurred under draped IMF conditions that are susceptible to reconnection with the underlying crustal anomalies. This investigation produces strong evidence linking discrete aurora to magnetic reconnection at Mars and provides insights into other trends in discrete auroral activation such as local time and upstream IMF conditions.

- ・夜側で局所的に短期間発生する**火星のディスクリートオーロラ**
- ・開いた磁力線に沿って加速された電子が火星の中性大気に降り込むことで発生
- ・MAVEN(IUVS)によるディスクリートオーロラの観測。強い地殻磁場上で最頻。特定の地方時と上流IMF条件下で起きる。
- 地殻磁場とIMFとの相互作用を支配するプロセスがディスクリートオーロラの発生を左右することを示唆。
- ・強地殻磁場領域上でのIUVSの観測結果49のうち、オーロラ発生場所の近くでdrapeしたIMFと地殻磁場が反平行になるはっきりとした傾向(42/49イベント)
- ディスクリートオーロラとdrapeしたIMF・地殻磁場間の磁気リコネクションとの関連を示した。Local Time(LT)や上流IMF条件との関連への洞察も提供。

# 火星ディスプレイトオーロラ



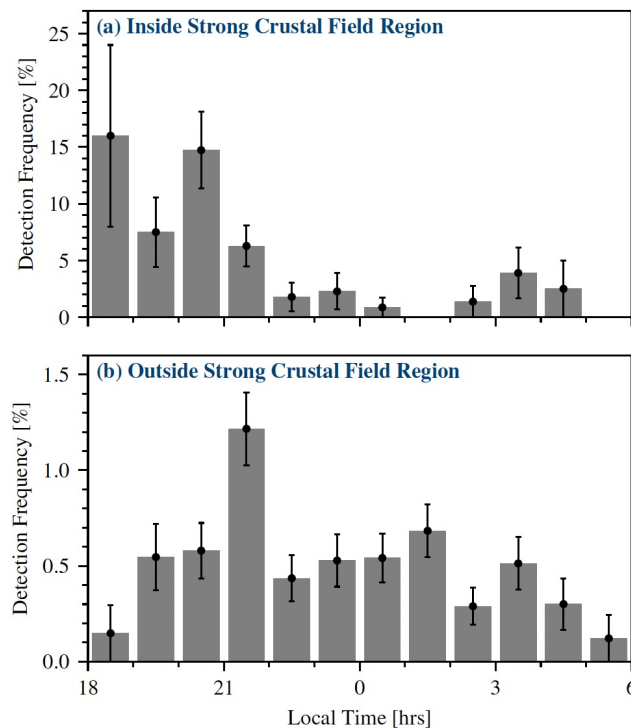
Schneider et al., 2021 Figure 1.より抜粋



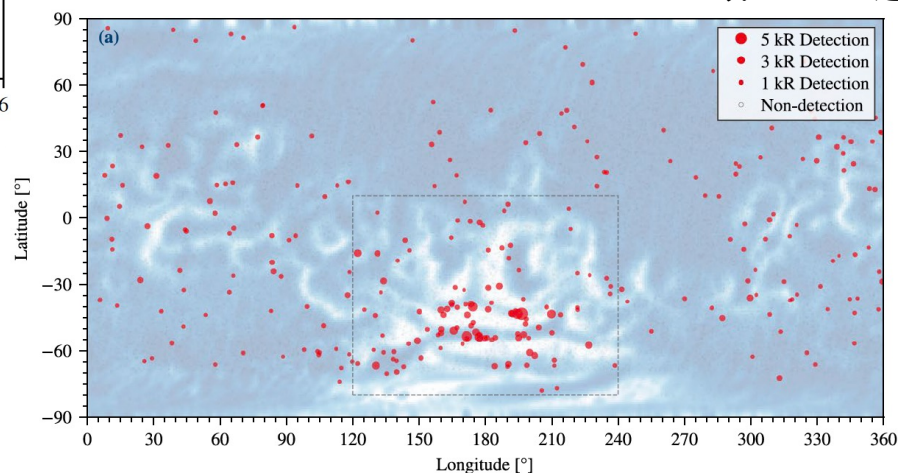
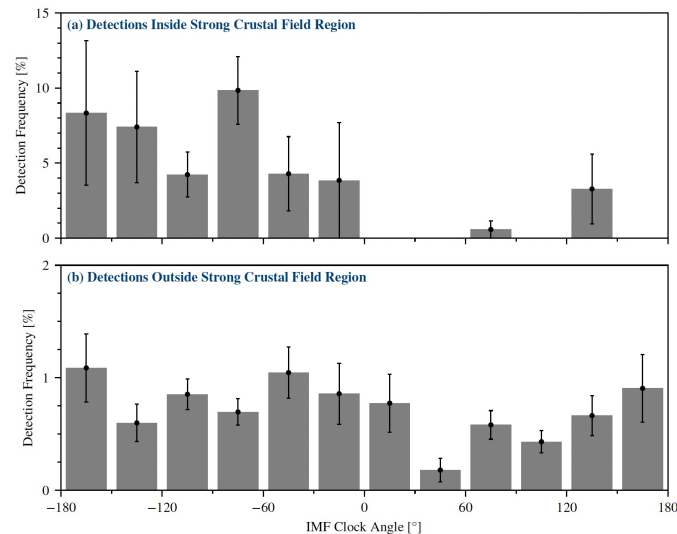
Schneider et al., 2015 Figure 5.より抜粋

- ・ 夜側で局所的に短期間生じ、強い地殻磁場上で最頻(Schneider et al., 2021)。
- ・ 開いた磁力線に沿って電子が降り込み中性大気に衝突することで発生する(e.g. Brain et al., 2006)。
- ・ MAVEN/IUVSやMEX/SPICAMで観測できるオーロラを発生させるようなオーロラ電子のエネルギー  $> 50\text{eV}$  (Soret et al. 2021)  
→火星夜側のnominalな電子のエネルギーよりも大きいため、何かしらの加速機構が必要。

# 火星ディスクリットオーロラのリム観測による観測結果

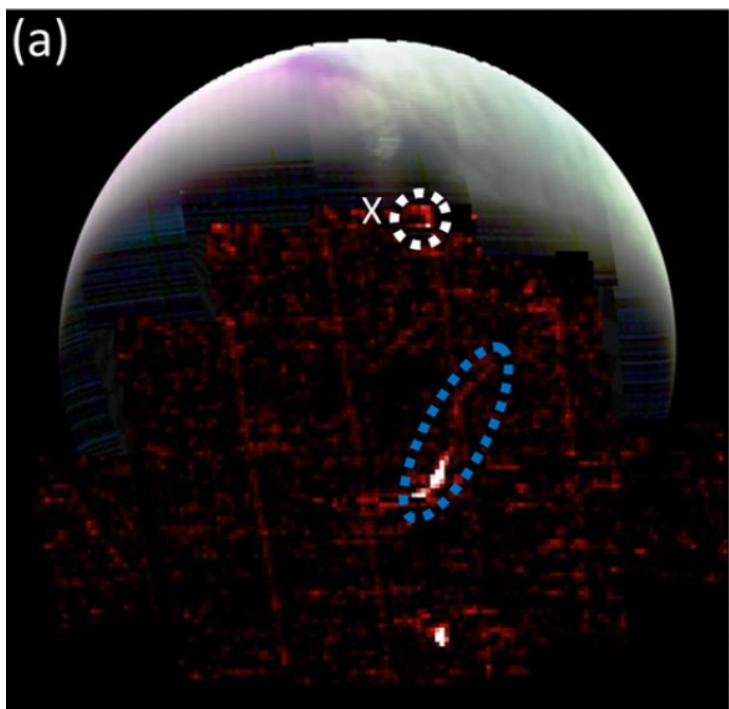


いずれもSchneider et al., 2021  
より抜粋、引用

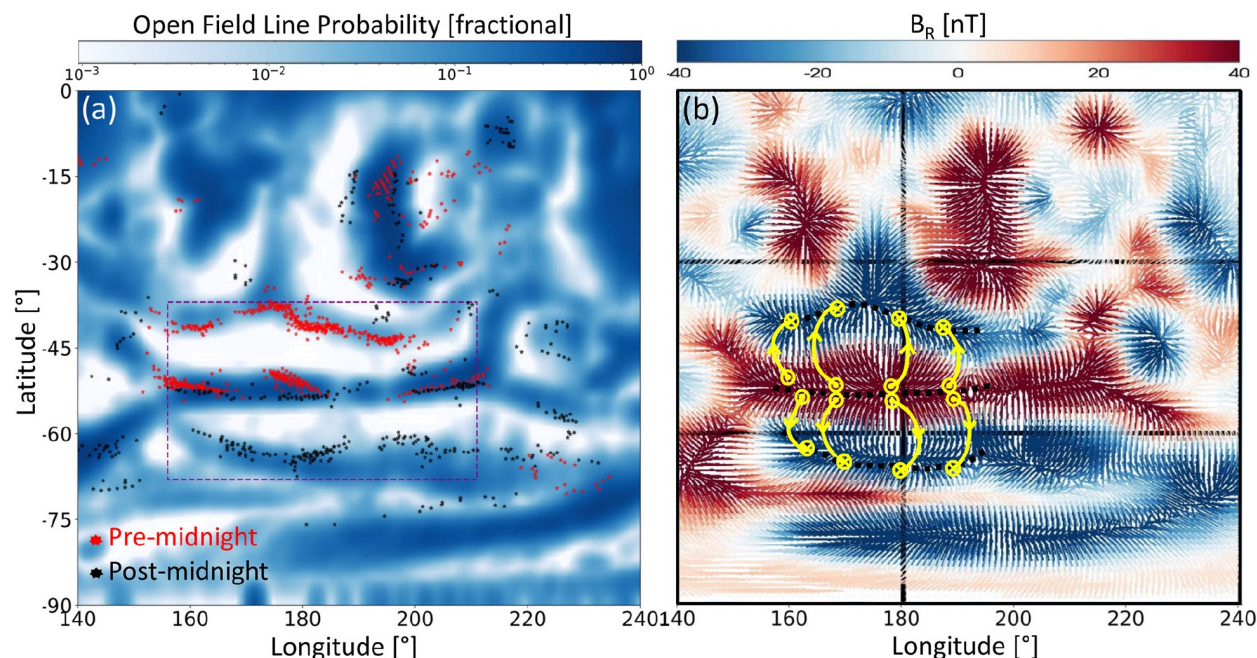


- ・強い地殻磁場領域内で頻発（下図）。
- ・強い地殻磁場領域内ではdusk方向の上流IMF、LT18:00~22:00での発生頻度が大きい傾向(Schneider et al. 2021)
- ディスクリットオーロラの発生は上流IMF条件と地殻磁場の強度や位置に依存
- 火星のディスクリットオーロラは、地殻磁場とIMFとの「ミニ磁気圏的な」相互作用の結果生じることを示唆
- ・しかし、リム観測では観測の制約（観測範囲、LT）によりディスクリットオーロラの領域ごとの違いを見るには不十分。

# 火星ディスクリートオーロラ为天底観測による観測結果

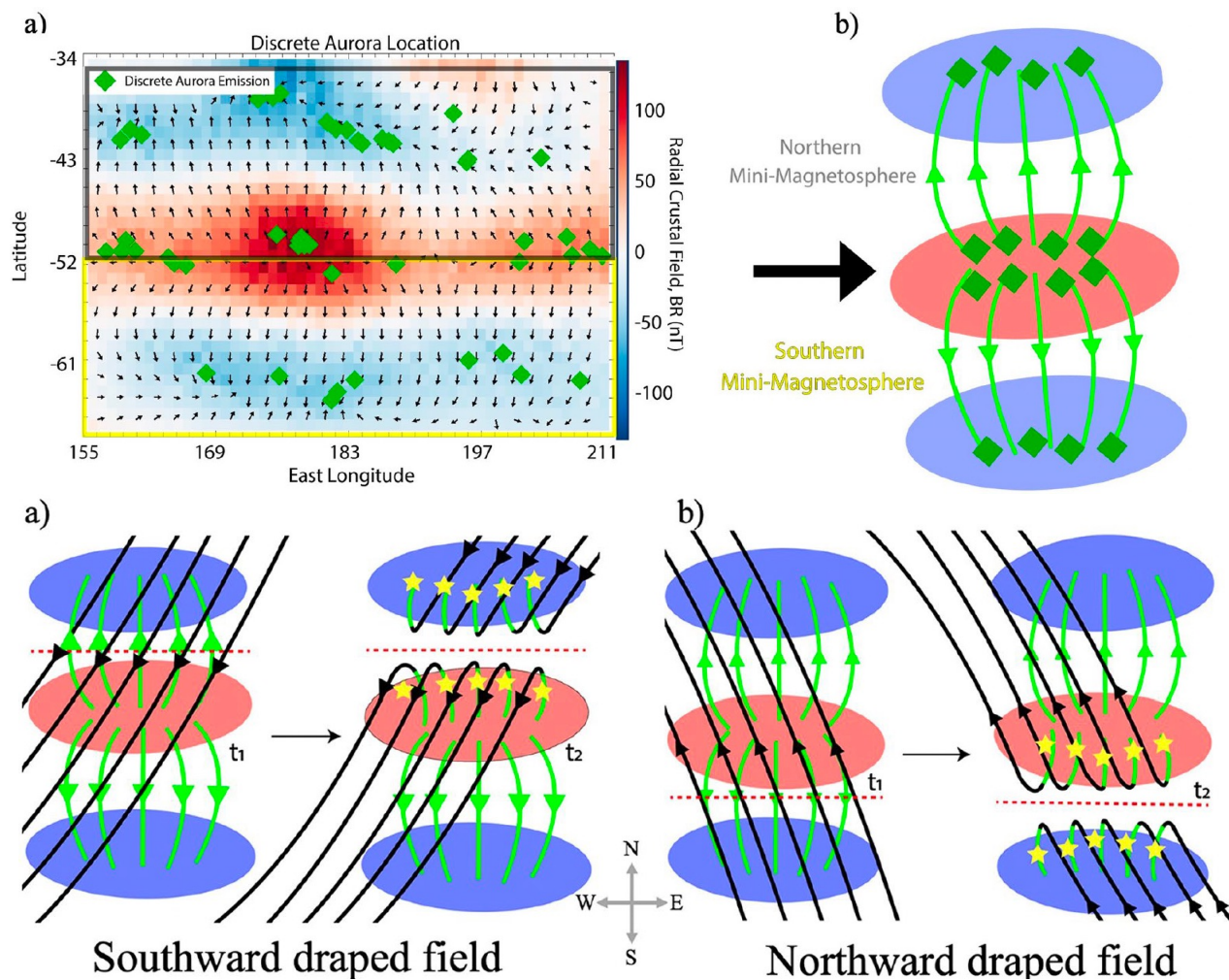


いずれも Johnston et al., 2023より引用、抜粋



- ・天底観測では、全球的な観測が可能（左図）  
→各軌道で空間的に十分な範囲での観測が可能のため、ミニ磁気圏的な相互作用について詳細に調べることができる。
- ・強い地殻磁場領域における**ディスクリートオーロラ発生場所のLTへの依存性**（上図左）と領域内の磁場の強さ、向き（上図右）  
→ディスクリートオーロラの上流IMF、地殻磁場、LT依存性を説明する**リコネクション仮説**（次スライド）

# ミニ磁気圏とリコネクション仮説



・左上図のように強い地殻磁場領域を**ミニ磁気圏**（南緯-34~-68°、東経155~211°）とみなし、この領域を $R_f$ と呼ぶ。

・ $R_f$ は三つの領域（中央に位置する赤の動径方向外向きの磁場領域とその南北に位置する青の動径方向内向き磁場領域）から成る。

## ・リコネクション仮説

→地殻磁場とdrapeしたIMFとの磁気リコネクションが、火星ディスクリートオーロラの形成の始まりにおいて主要な役割を担う。

→磁気リコネクションの結果生じた開いた磁力線に沿ってオーロラ電子が中性大気に降り込み、ディスクリートオーロラを発生させる、というシナリオ

# オーロライベントの解析

・リコネクション仮説の検証のため、地殻磁場とIMFとが「相互作用する領域」を定義。MAVENがオーロラを $R_f$ 内で観測した軌道と同一の軌道内でこの相互作用領域を通過している場合、下記の条件に基づいてオーロライベントを分類する。

・相互作用領域の定義→高度>700km, 緯度<南緯-20°

(高度はHolmberg et al., (2019)により推定された電離圏プラズマとショック太陽風プラズマとの境界の高度~630kmをわずかに上回る値としている。)

○条件に基づく分類

・LT

→ **Dusk** (18:00 < LT < 24:00)または**Dawn**(00:00 < LT < 06:00)のどちらでオーロラが観測されたか決定

・drapeした磁場の方向

→  $\psi = \arctan(B_E/B_N)$ を定義し、**drapeした磁場を南北いずれかに決定**

(磁気リコネクションが起きるか否かを仮定するにあたり、 $R_f$ 内の地殻磁場は南北方向に閉じていると考え、**drapeしたIMFの南北方向にのみ注目**する)

→北向き ( $0 \leq |\psi| \leq 90$ ) と南向き ( $90 < |\psi| \leq 180$ ) に分類する。

※E, Nはそれぞれ惑星座標系 ( $[\hat{R}, \hat{E}, \hat{N}]$ 、 $\hat{R}$ :火星の動径方向外向き $\hat{E}$ :地理的東向き, $\hat{N}$ :地理的北向き) におけるdrapeした磁場の東, 北向き成分

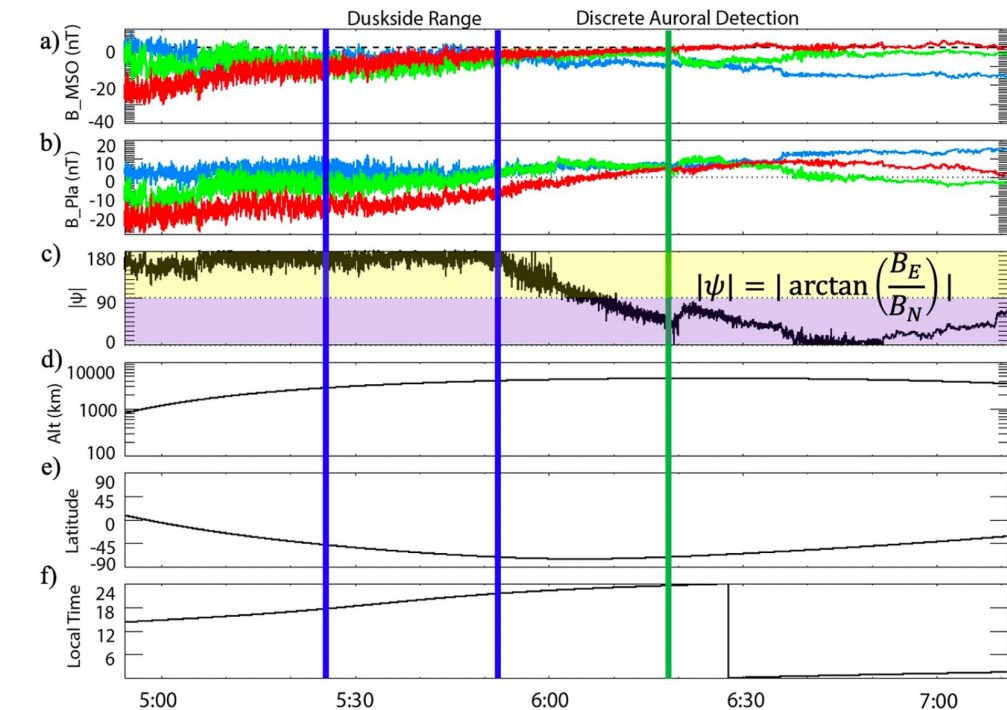
# オーロライベントの解析

以下の流れで解析を進める：

1. 前述の条件に基づく相互作用領域とオーロラが観測された位置の dusk/dawn の決定
2. オーロラが検知された軌道沿いに MAVEN が 1. の相互作用領域を観測しているか確認
3. 相互作用領域内で平均の  $|\psi|$  を計算



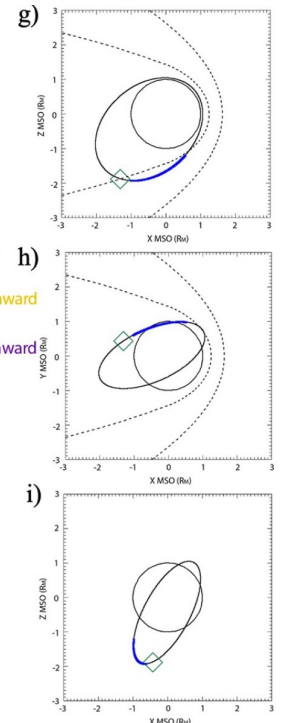
IUVS が  $R_f$  上でディスクリットオーロラを観測した **49 イベント** について  
同様の操作を行う



October 02, 2019

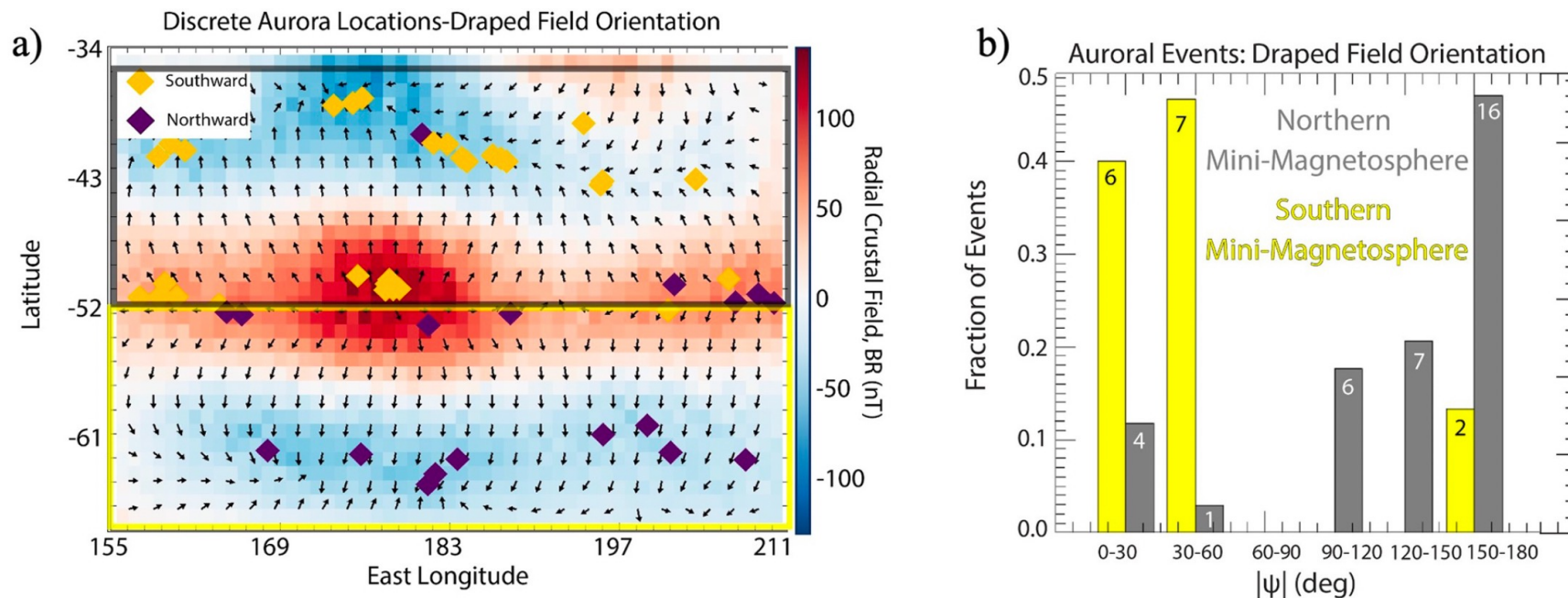
MAVEN が「相互作用領域」内で観測  
(右上図g~hの青線部分に対応)

IUVS がオーロラを検知  
(右上図緑四角に対応)



- ↑ の例の場合、
- ・ **相互作用領域** の平均高度: 3252km 平均緯度:  $-57.5^\circ$  平均LT: 16LT
  - ・ drapeした磁場の方向:  $|\psi| = 172^\circ$  (南向きIMF)
  - ・  $R_f$  内で **オーロラ** が観測されたLT:  $\sim 20:00$  (**Dusk**)

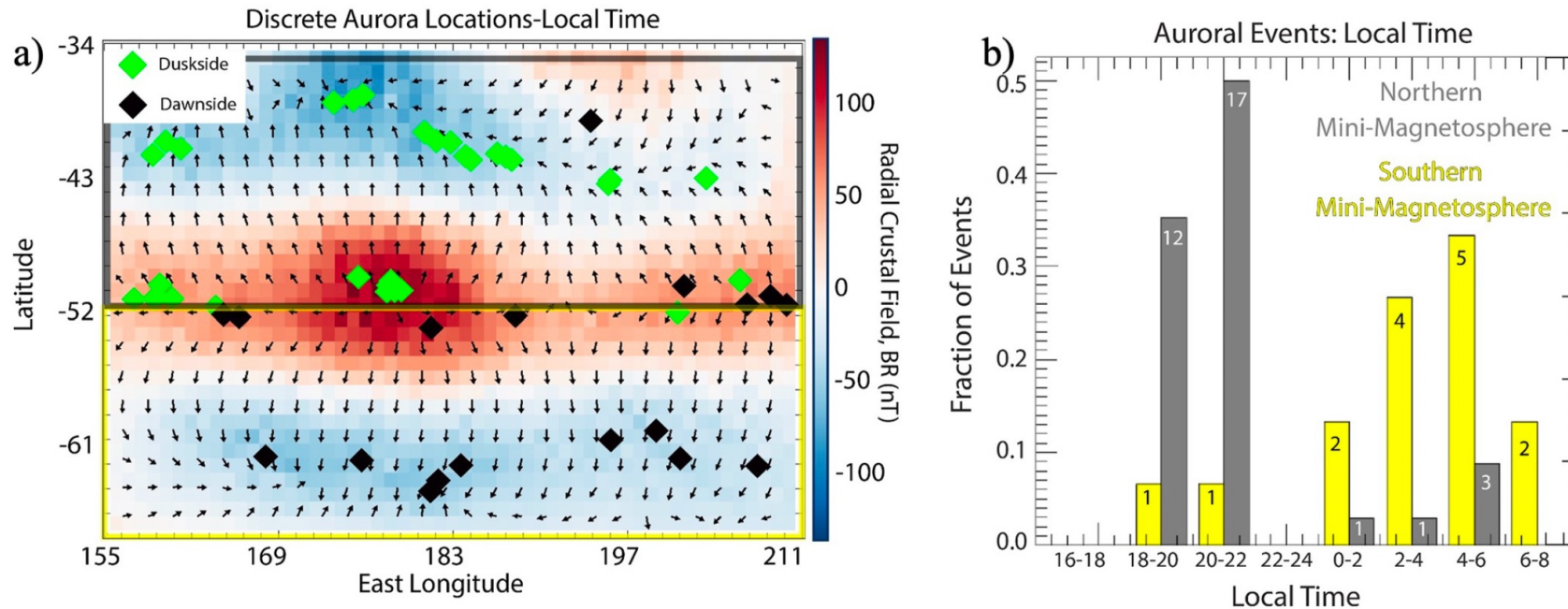
# オーロラ発生場所 VS. draped 磁場の方向 $|\psi|$



- ・ 橙色: 南向き ( $|\psi| > 90^\circ$ ), 紫色: 北向き ( $|\psi| < 90^\circ$ )
- ・ 北側のミニ磁気圏(地殻磁場は北向き)におけるイベント34のうち、29(85%)が南向き
- ・ 南側のミニ磁気圏(地殻磁場は南向き)におけるイベント15のうち、13(87%)が北向き
- ・ ディスクリートオーロラが東西方向よりも南北方向の $\psi$ において頻発

→各ミニ磁気圏でリコネクションに適した磁場の向き（地殻磁場とIMFとが反平行方向）となっており、リコネクション仮説を支持する結果と言える。

# オーロラ発生場所 VS. LT



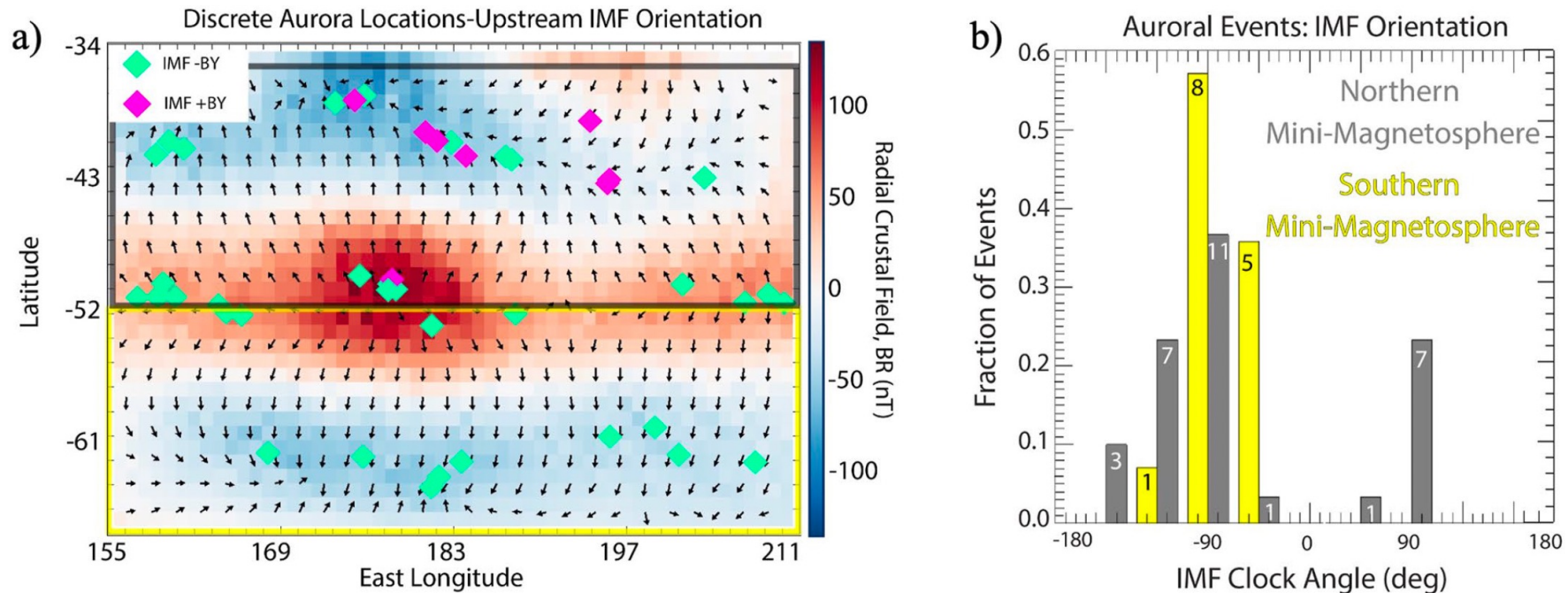
- ・ 緑色: **Dusk側**(18:00 < LT < 24:00), 黒色: **Dawn側**(00:00 < LT < 06:00)
- ・ 北側のミニ磁気圏におけるイベント34のうち、29(85%)が $R_f$ が**Dusk側**
- ・ 南側のミニ磁気圏におけるイベント15のうち、13(87%)が $R_f$ が**Dawn側**

・ Drapeした磁場とLTとの関連

→ **Drapeした磁場が北向き**のイベントのうち97%で $R_f$ が**dawn側**にあり、**南向き**のイベントのうち94%で $R_f$ が**dusk側**にある。

→  $R_f$ 内でのオーロラ発生に適した上流磁気圏の条件も調べる (次スライド)

# オーロラ発生場所 VS. 上流IMF clock angle

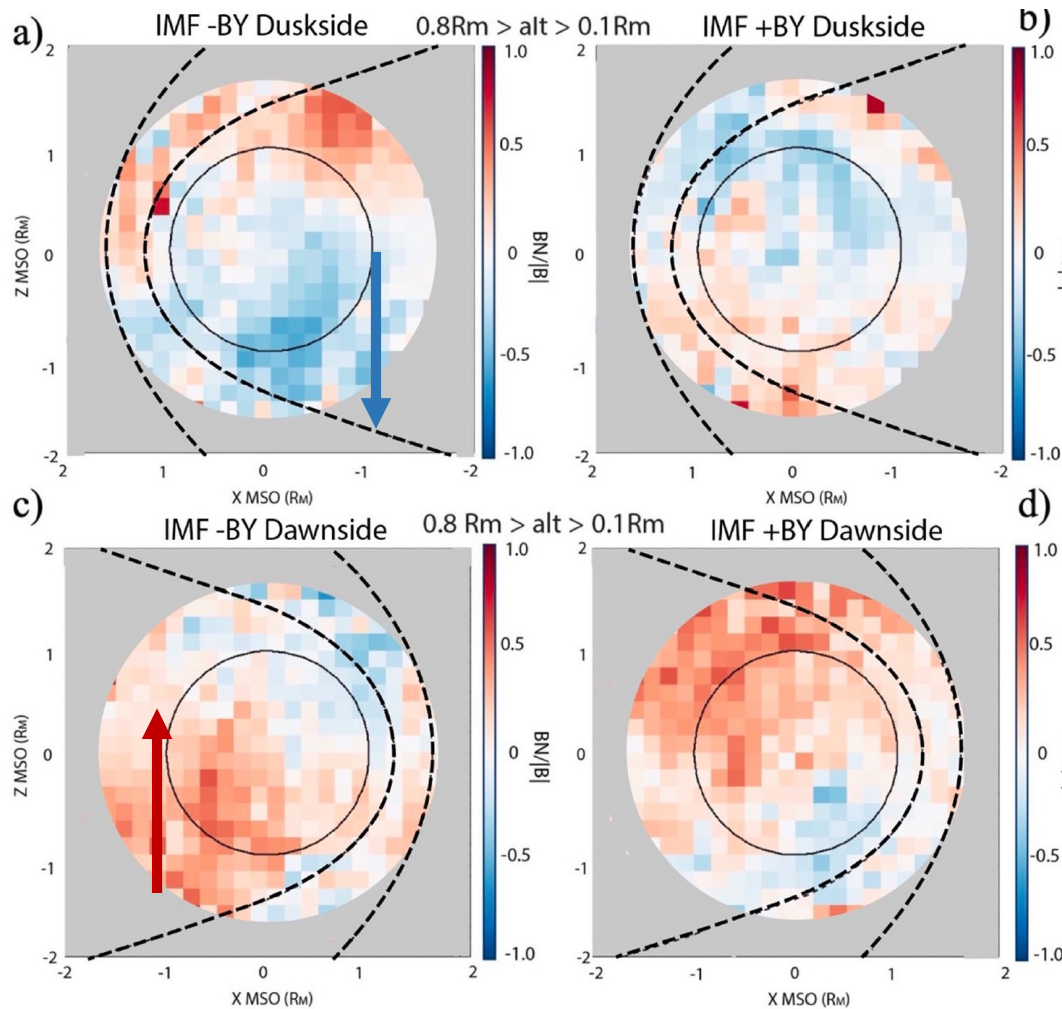


- ・ **ライム**:  $-BY_{MSO}$  ( $\theta < 0^\circ$ ), **マゼンタ**:  $+BY_{MSO}$  ( $\theta > 0^\circ$ )

※  $\theta$  は  $\theta = \arctan(BY_{MSO}/BZ_{MSO})$  で定義される IMF clock angle。  $\hat{Y}, \hat{Z}$  はそれぞれ MSO 座標系における上流 IMF の Y, Z 成分

- ・ 北側のミニ磁気圏におけるイベント30のうち、22(73%)が  $-BY_{MSO}$  条件下
  - ・ 南側のミニ磁気圏におけるイベント14のうち、14(100%)が  $-BY_{MSO}$  条件下
  - ・ (b)からも、  $-BY_{MSO}$  ( $-180^\circ < \theta < 0^\circ$ ) で多くのオーロラが検知されていることがわかる。
- 火星の磁気圏トレンドについてさらに深掘りする (次スライド)。

# Nominal draped IMF conditions



- MAVEN/MAGが2014年11月～2020年12月の間に観測したIMFを、の向き ( $\pm Y_{MSO}$ ) と観測地点(Dawn/Dusk)によって分類しXZ面内で $0.2R_M \times 0.2R_M$ ビンごとにプロット (オーロラの有無は問わない)。
- $0.1-0.8R_M$ の高度範囲の球殻領域で観測した磁場の向きを平均してXZ面に投影している。
- 南北方向の磁場に注目したいので、 $B_N$ を磁場のN方向として $B_N/|B|$ を各ビン内で平均している。  
(Figure 9.に加筆)

○Dusk側 (上段)

- $-B_Y \rightarrow$  夜側南半球で南向き (青)
- $+B_Y \rightarrow$  東西方向、僅かに南向き

○Dawn側 (下段)

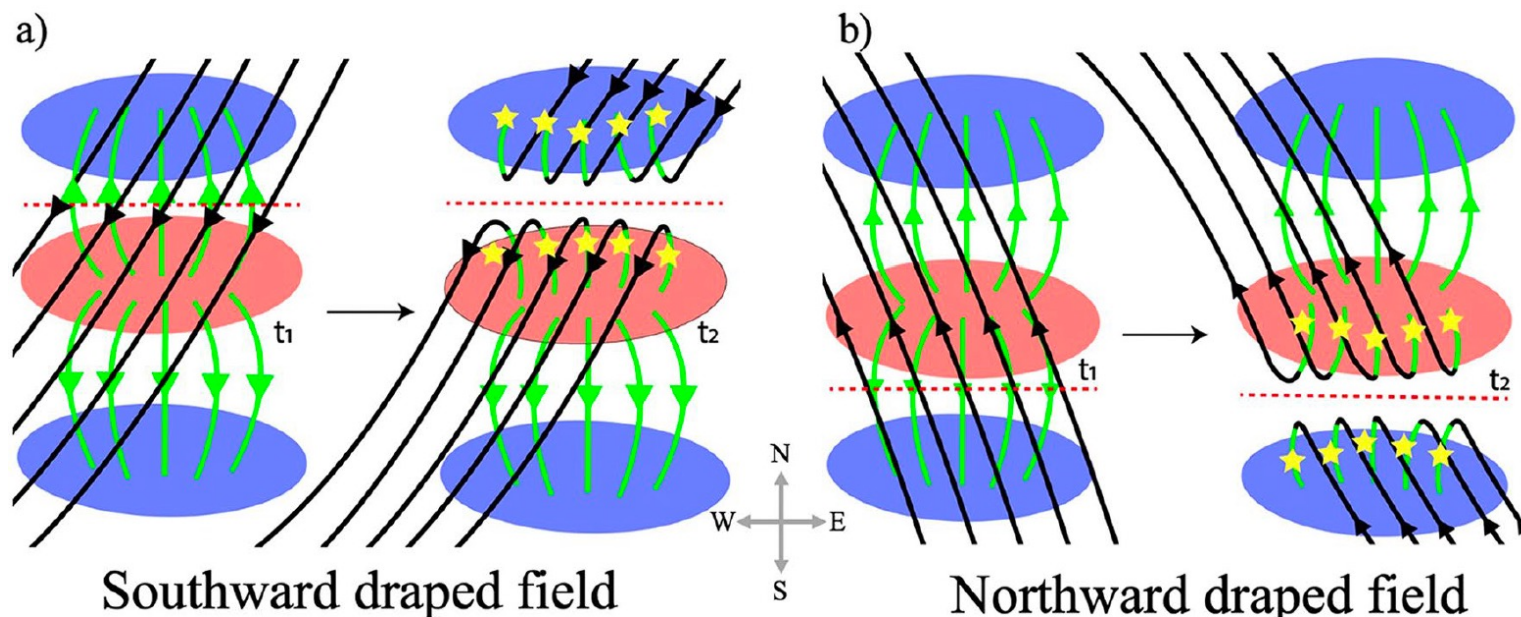
- $\pm B_Y$ いずれにおいても夜側では北向き (赤)

## 結果のまとめ

○ディスクリートオーロラに関連する次の三つの磁気圏トレンドがわかった。

1. **北（南）ミニ磁気圏**は**南（北）向き磁場**条件でディスクリートオーロラが観測されることが多い。
  2.  $R_f$ が**Dusk(Dawn)**側にある時、ディスクリートオーロラは**北（南）ミニ磁気圏**で観測されることが多い。
  3. **南北ミニ磁気圏**のいずれにおいても、**上流IMF**が-  $Y_{MSO}$ 方向の時にディスクリートオーロラが観測されることが多い。
- 1と2, 3に分けて考察。

## 考察 1 南北ミニ磁気圏の磁場とdrapeした磁場との反平行方向関係



・「地殻磁場とdrapeした磁場との磁気リコネクションが、 $R_f$ 内のミニ磁気圏におけるディスクリートオーロラの形成に重要な役割を果たす。」という**仮説を支持**する結果。

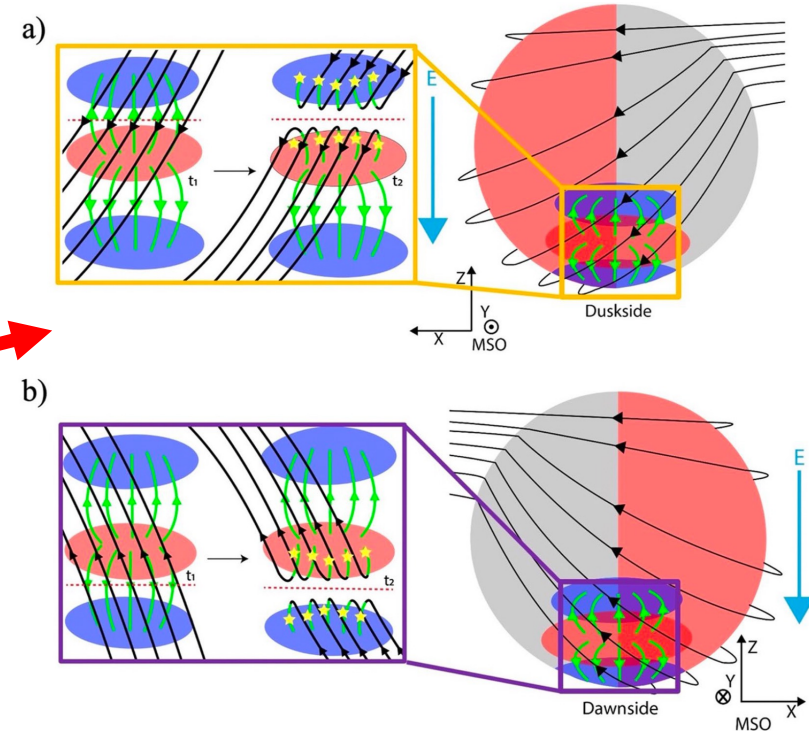
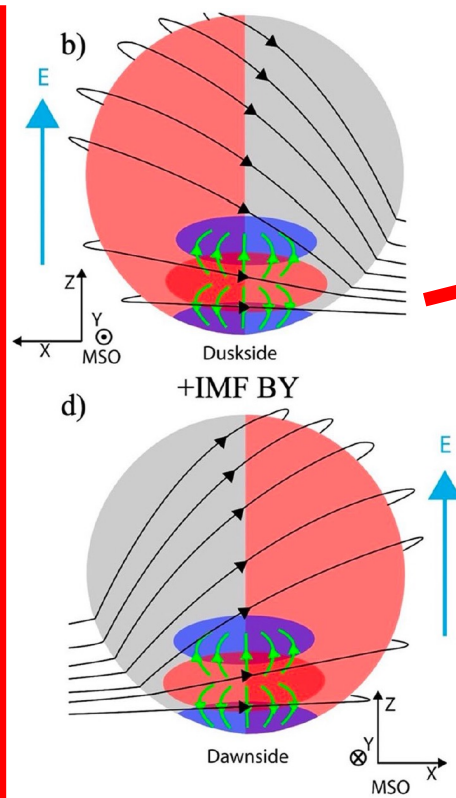
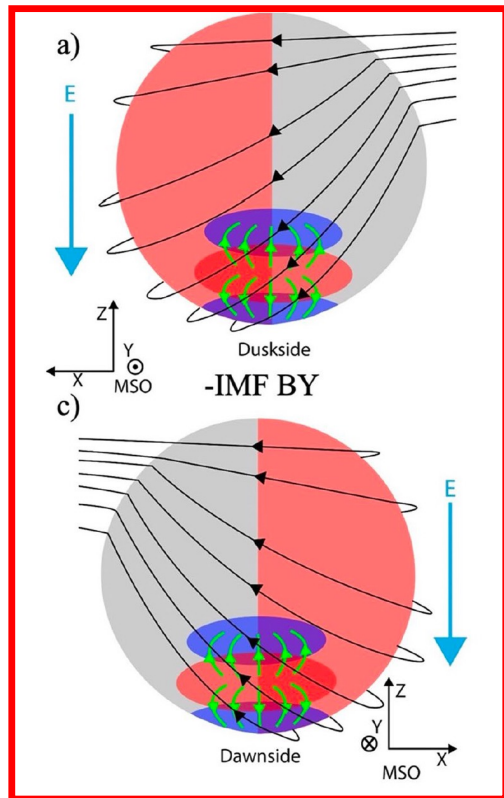
・リコネクションの結果、電離圏と高エネルギーの太陽風プラズマとをつなぐ開いた磁力線が生じる。

・磁気圏中の電子をオーロラ電子のエネルギーまで加速させるポテンシャル構造も生み出す(Poppe et al., 2021)。

・**磁気リコネクションとディスクリートオーロラを紐づける初の結果**

→  $R_f$ 内外での磁気圏、地殻磁場の位置に関する特定の条件下におけるディスクリートオーロラの発生場所の理解や、より良いモデルへの貢献。

## 考察2,3 ディスクリートオーロラ発生場所とLT、上流IMFの関係



○結果2,3: Dusk(Dawn)側では、北(南)ミニ磁気圏上でオーロラが観測。いずれのミニ磁気圏でも上流IMFは $-Y_{MSO}$ 方向  
 ・プラズマに凍結した磁場が**太陽風電場**  
 ( $E_{sw} = -v_{sw} \times B_{IMF}$ )の影響によってプラズマとともに動く  
 →  $-Y_{MSO}$ 方向の上流IMF条件の方が、 $+Y_{MSO}$ よりも**リコネクションに適した磁場の状況**を作り出す。

## まとめ

- **強地殻磁場領域( $R_f$ )上のMAVEN/IUVSの天底観測で得られた49のディスクリートオーロライベントを解析し、リコネクション仮説（地殻磁場とdrapedなIMFとの磁気リコネクションがディスクリートオーロラの前兆となる）を検証した。**
- **地殻磁場とIMFが互いに反平行な向きになるという条件下でオーロラ発生が頻繁に見られ、リコネクション仮説を支持する結果となった。**
- **未解明であったディスクリートオーロラ発生場所のLTと上流IMF条件への依存性も、リコネクション仮説で説明することに成功した。**