

# 惑星間空間磁場北向き時のDungey リコネクション

渡辺正和<sup>1</sup>, 蔡東生<sup>2</sup>, 熊沛坤<sup>2</sup>, 藤田茂<sup>3</sup>, 田中高史<sup>1</sup>

1. 九州大学, 2. 筑波大学, 3. 統計数理研究所

# リコネクションのカタログ (北向きIMFを念頭に)

型記号の凡例

Rx = reconnection

核文字

- A: 北半球のnull近傍Rx
- B: 南半球のnull近傍Rx

添字1文字目

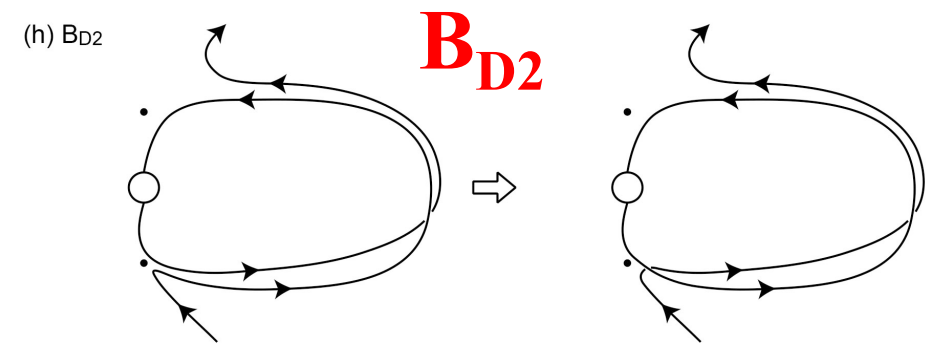
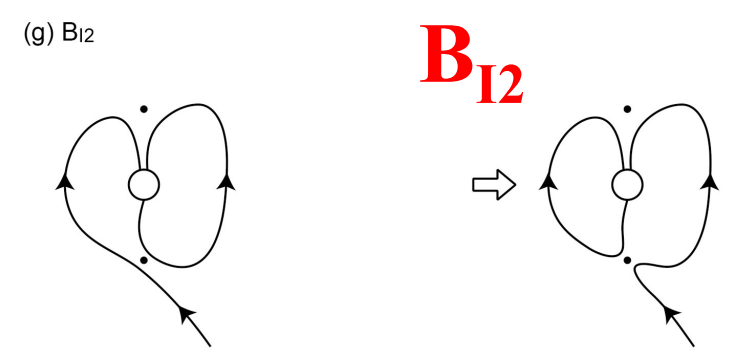
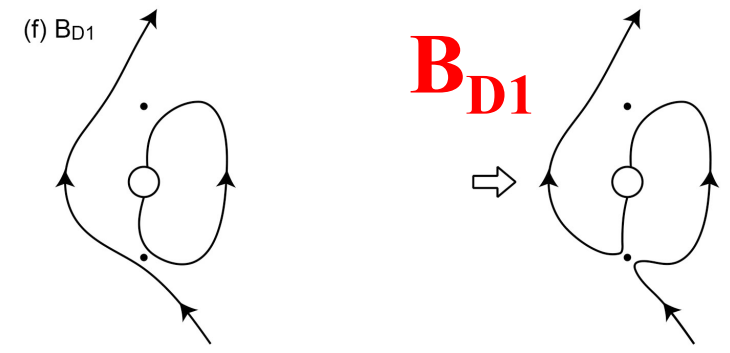
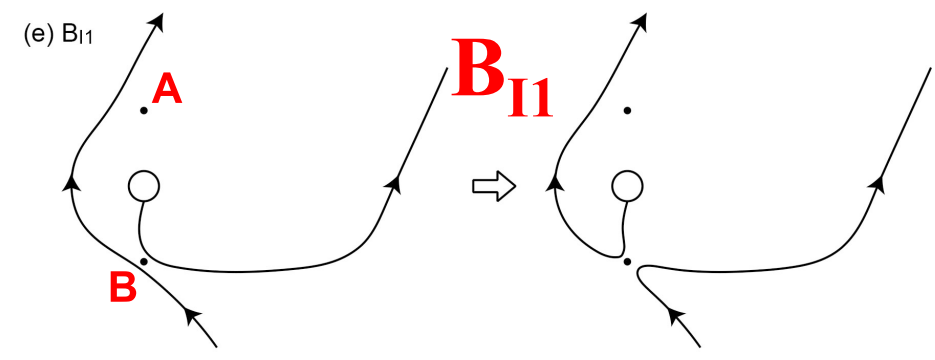
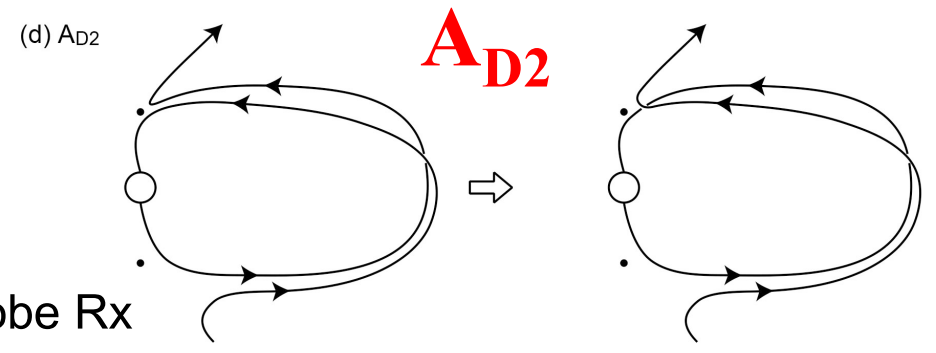
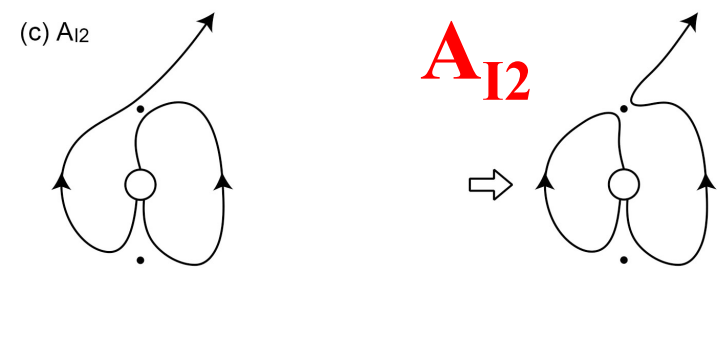
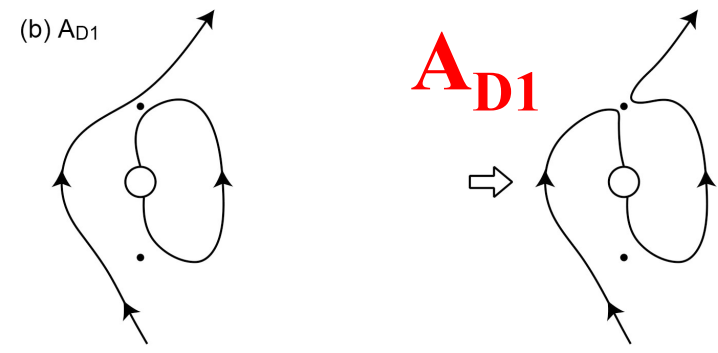
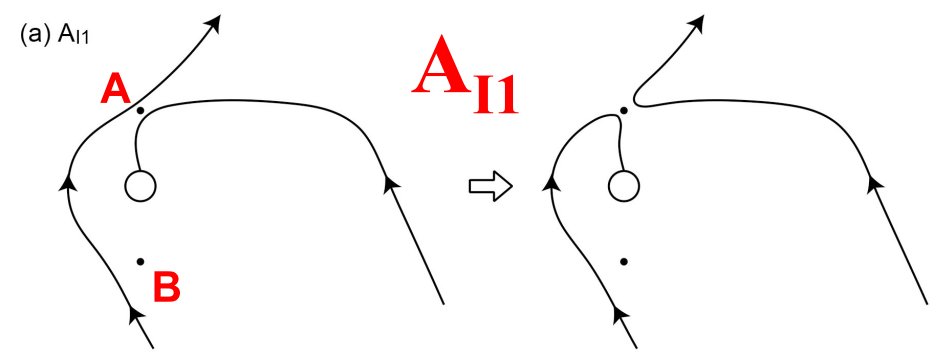
- I: Interchange-type Rx  
P + Q → Q + P
- D: Dungey-type Rx  
P + Q → R + S

添字2文字目

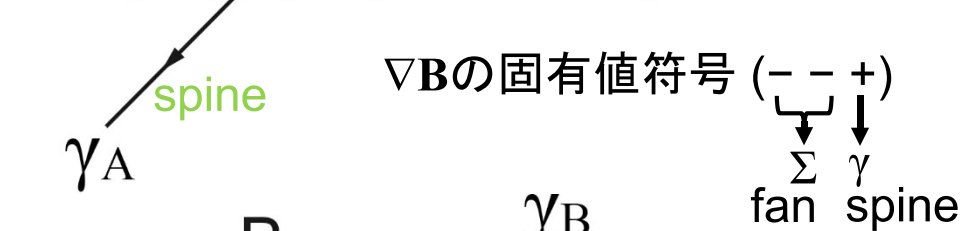
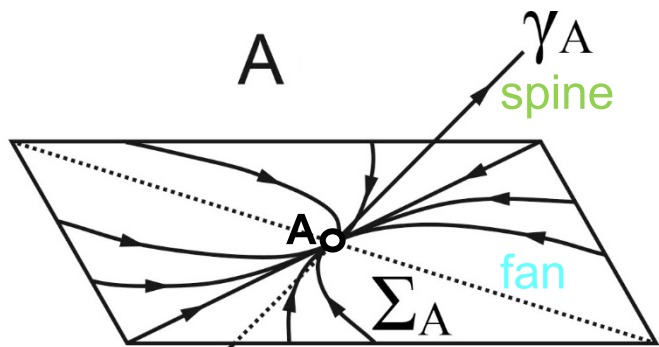
- 1: 昼間側磁気圏  
(magnetopause)でのRx
- 2: 夜側磁気圏(磁気圏内部)でのRx

添字の具体形

- I1: IMF + lobe Rx
- I2: lobe + closed Rx
- D1: IMF + closed Rx
- D2: north lobe + south lobe Rx



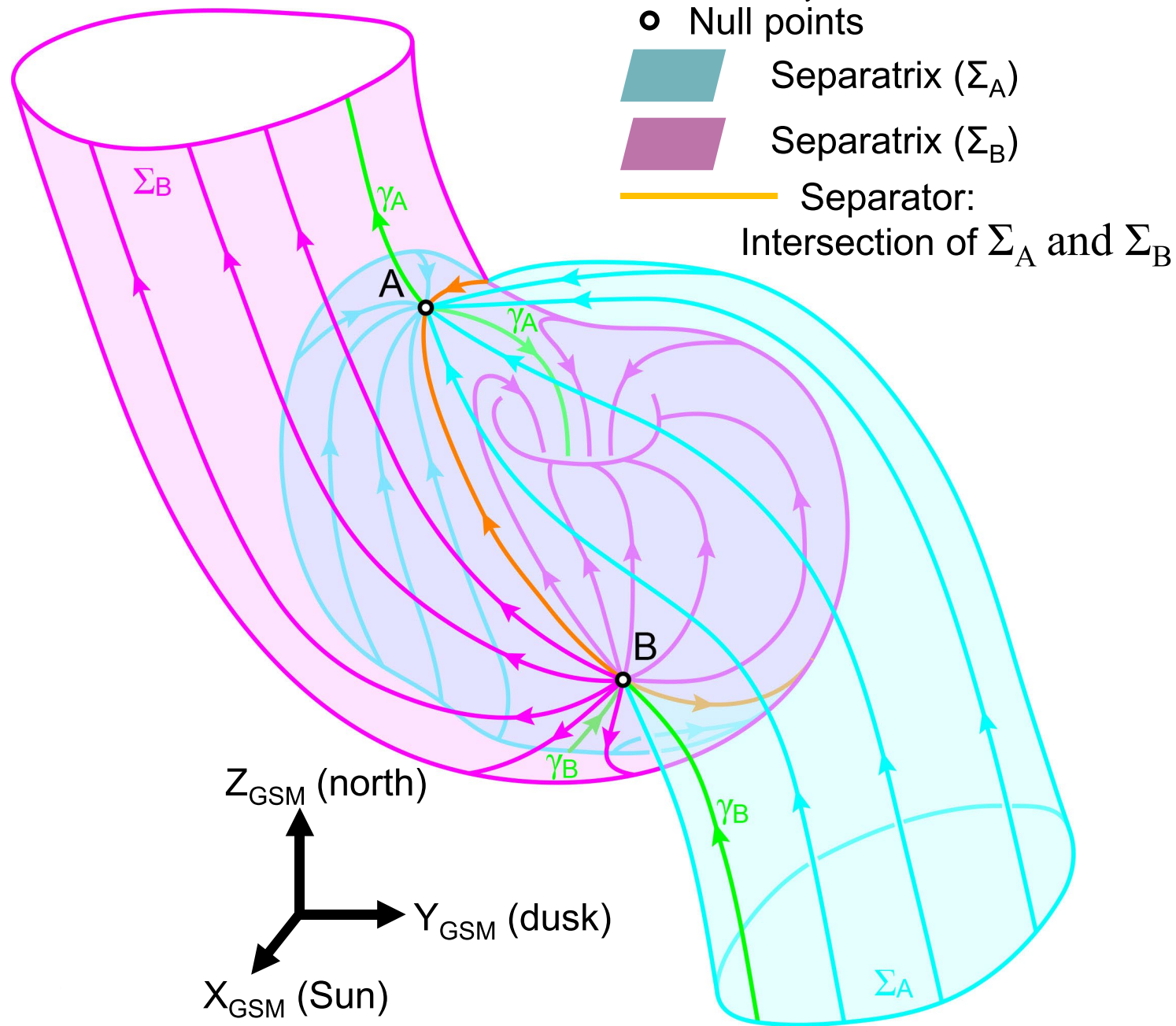
零点近傍の磁場構造



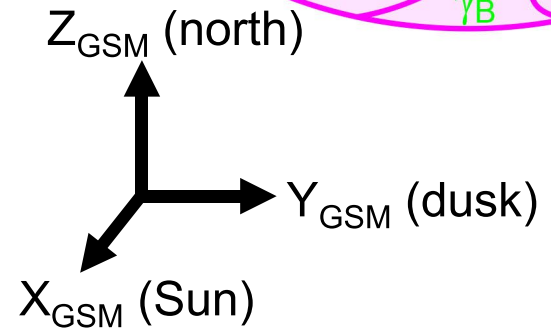
$\nabla B$ の固有値符号  $(- \quad - \quad +)$   
 $\underbrace{\quad \quad \quad}_{\Sigma}$   $\underbrace{\quad \quad \quad}_{\gamma}$   
 fan spine

$\nabla B$ の固有値符号  $(+ \quad + \quad -)$   
 $\underbrace{\quad \quad \quad}_{\Sigma}$   $\underbrace{\quad \quad \quad}_{\gamma}$   
 fan spine

The 2-null, 2-separator structure ( $B_y < 0$ の場合)



- Null points
- ▭ Separatrix ( $\Sigma_A$ )
- ▭ Separatrix ( $\Sigma_B$ )
- Separator: Intersection of  $\Sigma_A$  and  $\Sigma_B$



## 問題意識

Rx = reconnexion, or reconnection

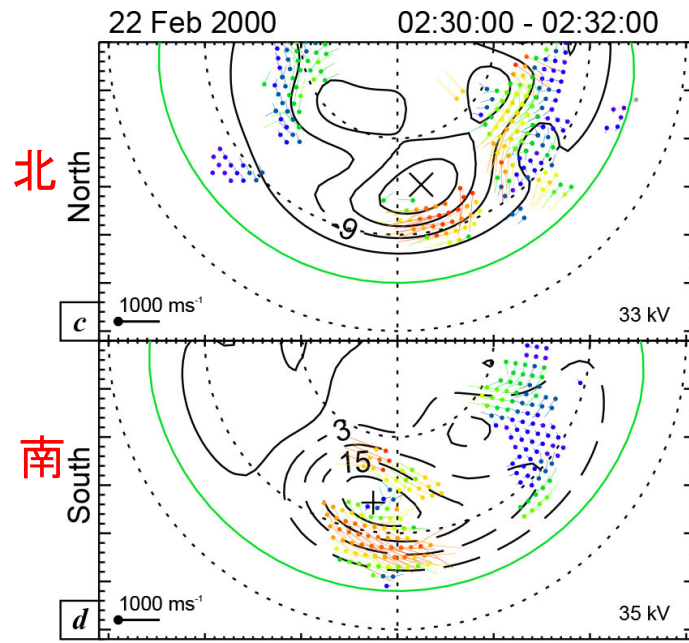
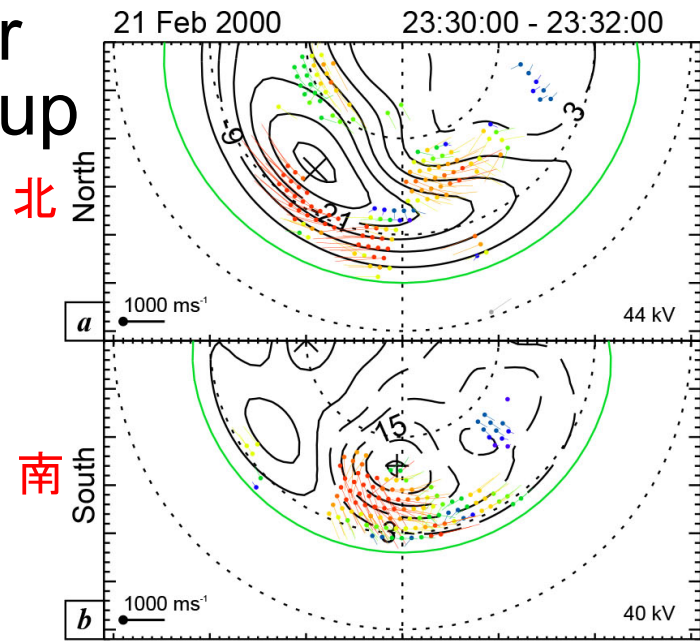
南向きIMF  $\Rightarrow$  Dungeyサイクル: Dungey型Rxによる磁気圏対流。昼間側で閉磁力線が開いて夜側で閉じる。  
北向きIMF  $\Rightarrow$  交換サイクル: 交換型Rxによる対流。昼間側に逆向き対流セルが現れる。

IMF北向き時、特に真北に近い時であっても、Dungey型Rxの形跡がみられる。例えばGeotailの観測では、磁気圏尾部において北向き磁場(おそらく閉磁力線)が地球方向に運ばれている。電離圏においても夜側に対流セルが現れる。では夜側のDungey型Rx(北ローブと南ローブのつなぎ換え)は

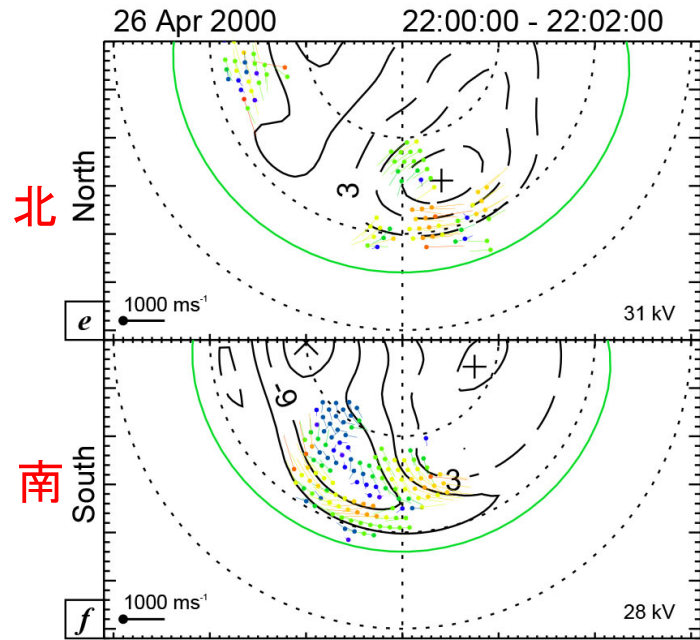
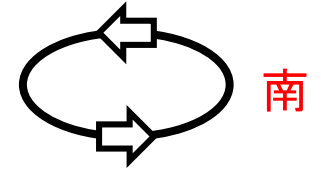
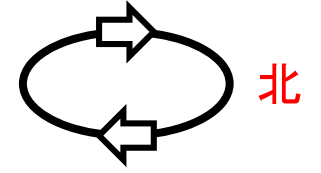
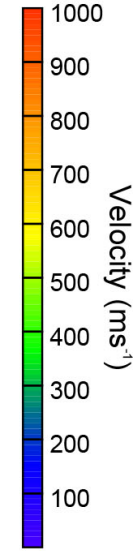
- どのような形状(geometry)で起こるのか？
- 交換型Rxとどのように共存するのか？

Leicester  
Univ group

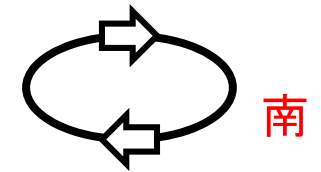
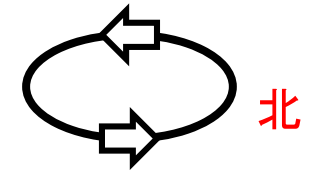
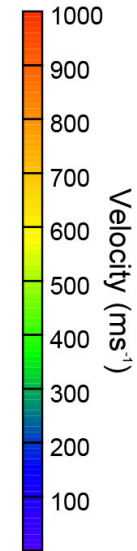
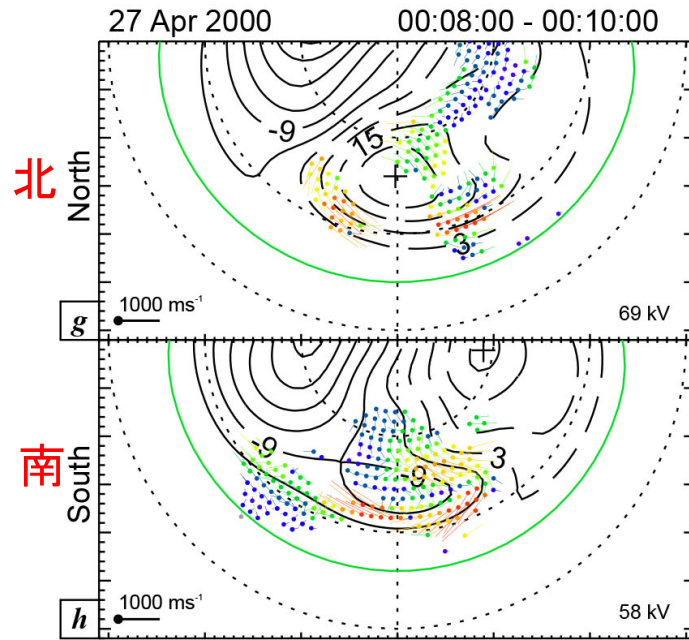
$\theta \approx -45^\circ$   
 $B_y < 0$



SuperDARN observations



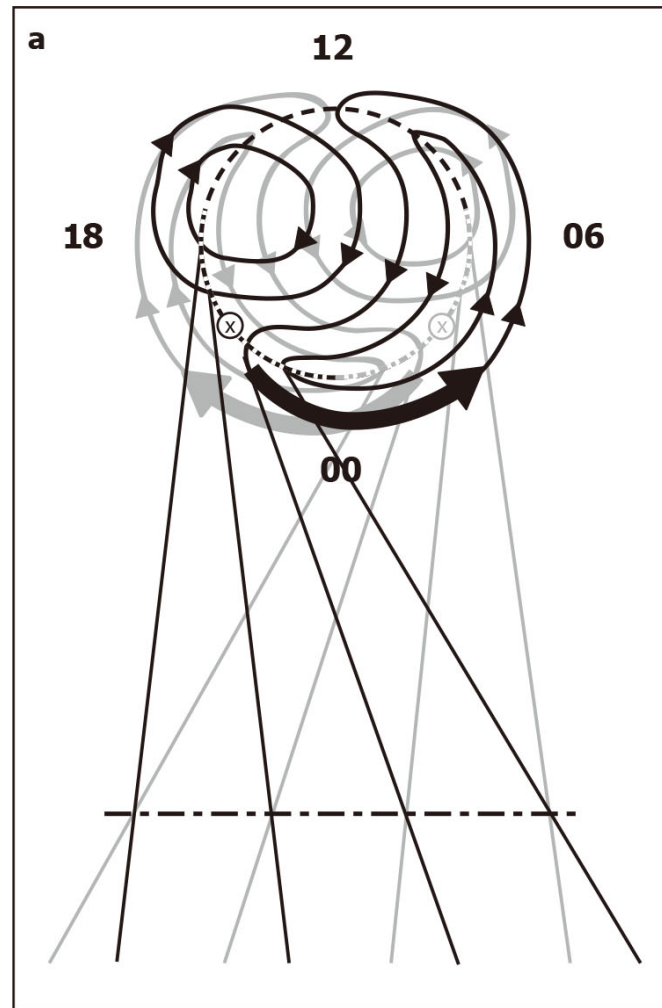
$\theta \approx +45^\circ$   
 $B_y > 0$



Grocott et al. (2005)

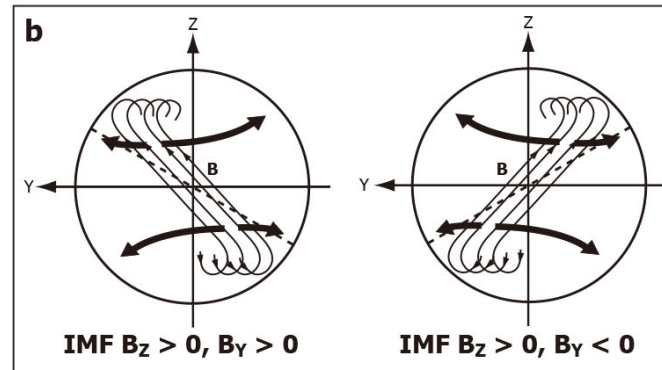
# Interpretation by Leicester U group

磁気圏尾部におけるDungey型リコネクション(南北lobe磁力線の再結合)が起源である。



$B_y > 0$  の場合  
黒: 北半球  
灰: 南半球

$B_y < 0$  の場合  
灰: 北半球  
黒: 南半球



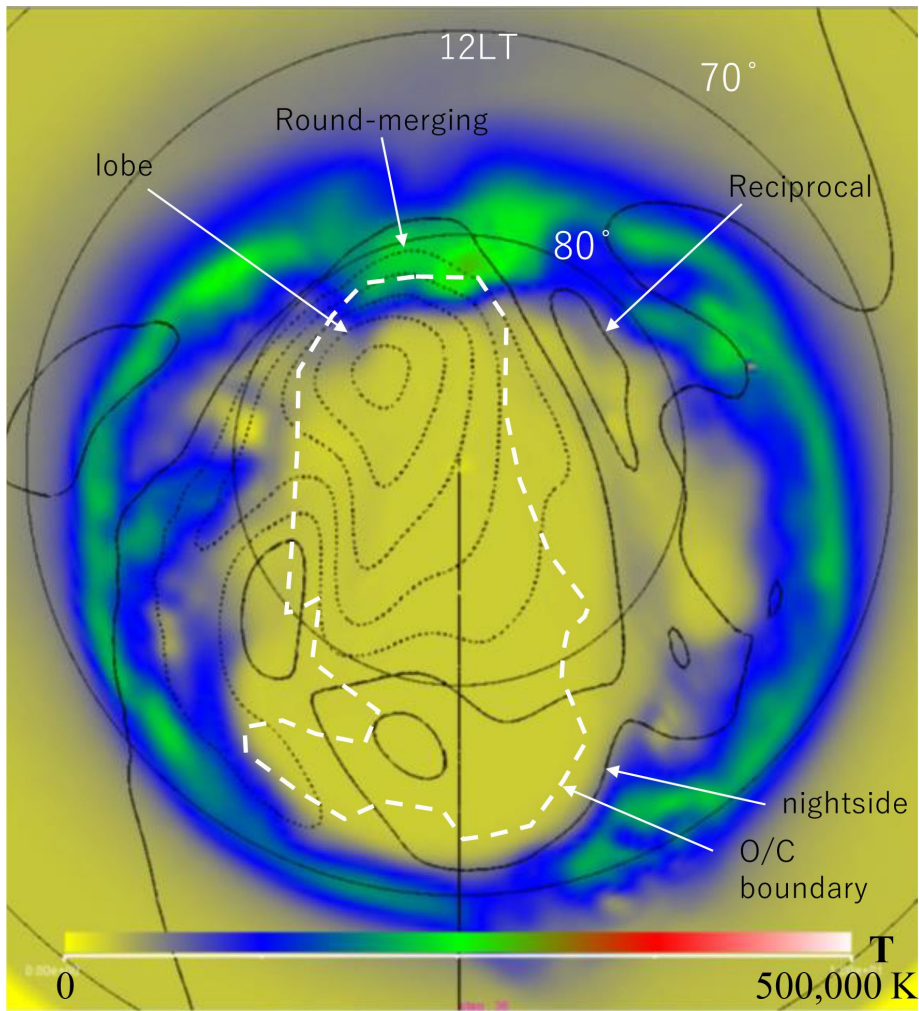
リコネクション直後の閉磁力線を  
尾部から太陽方向へ見たもの。

S字状磁力線が縮む“張力”で対  
流が励起される。

Grocott et al. (2005)



# MHD simulation IMF $B = 2.8 \text{ nT}$ , $\theta = -31^\circ$ ( $B_y < 0$ )

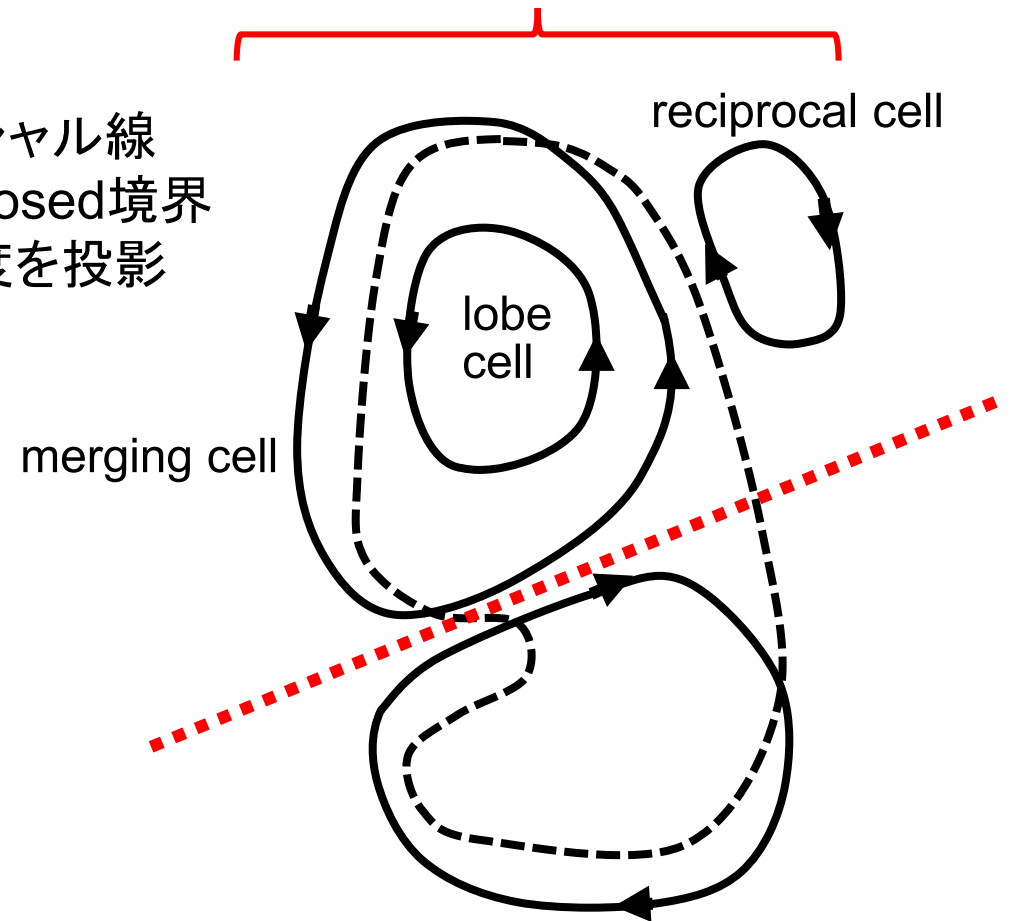


Tanaka et al. (2024)

## 北半球電離圏

黒線: 等ポテンシャル線  
白破線: open-closed境界  
色: 3Reでの温度を投影

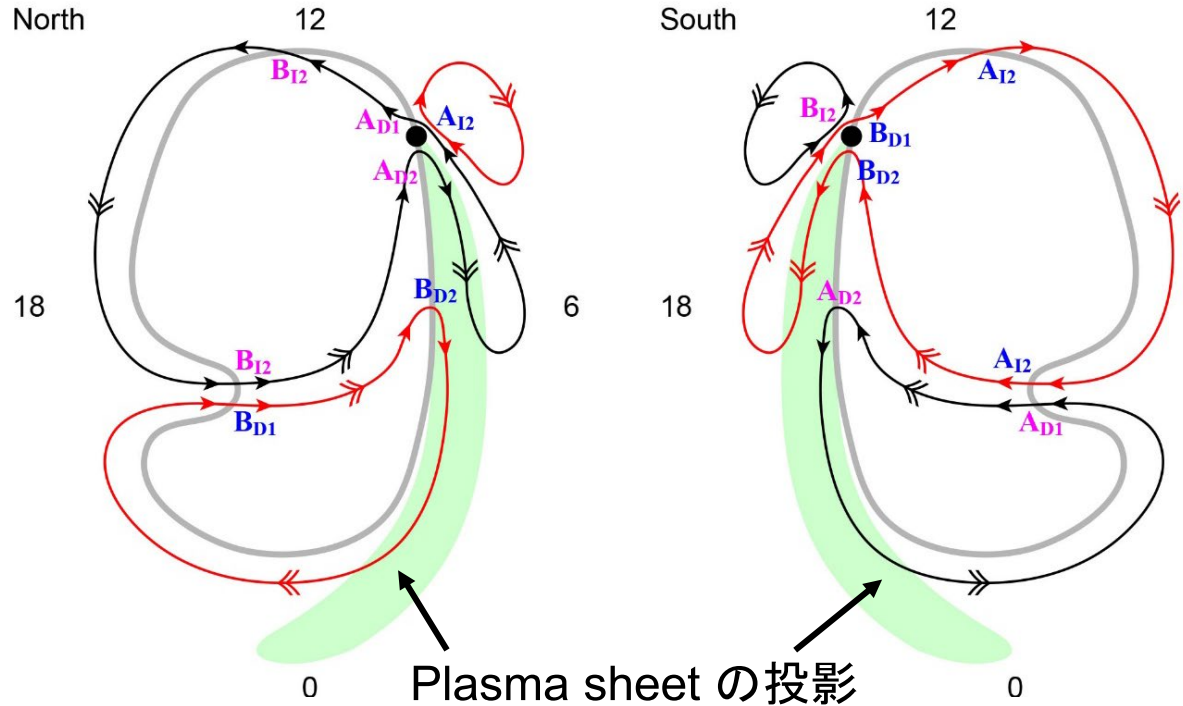
## Lobe cycle + Interchange Cycle



夜側merging cellの起源は？

# Tanaka et al. (2024) interpretation

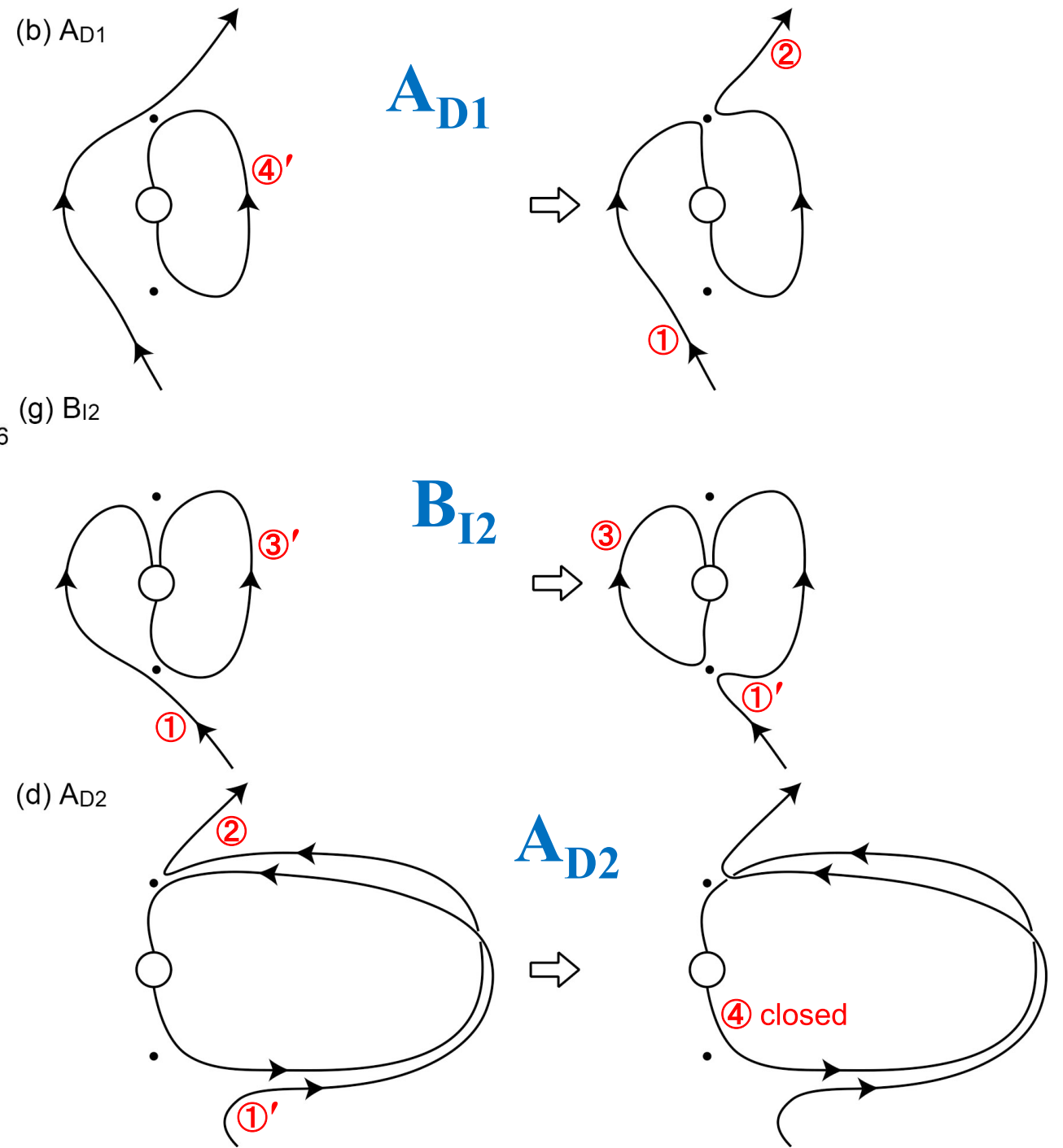
## Hybrid cycle (Dungey cycle modified by interchange Rx)



●は磁気零点から出るstemline ( $\gamma$ ) のfootprint

上図の黒い流線に沿う磁束循環が右図

問題はDungey型Rxをどうやって起こす？

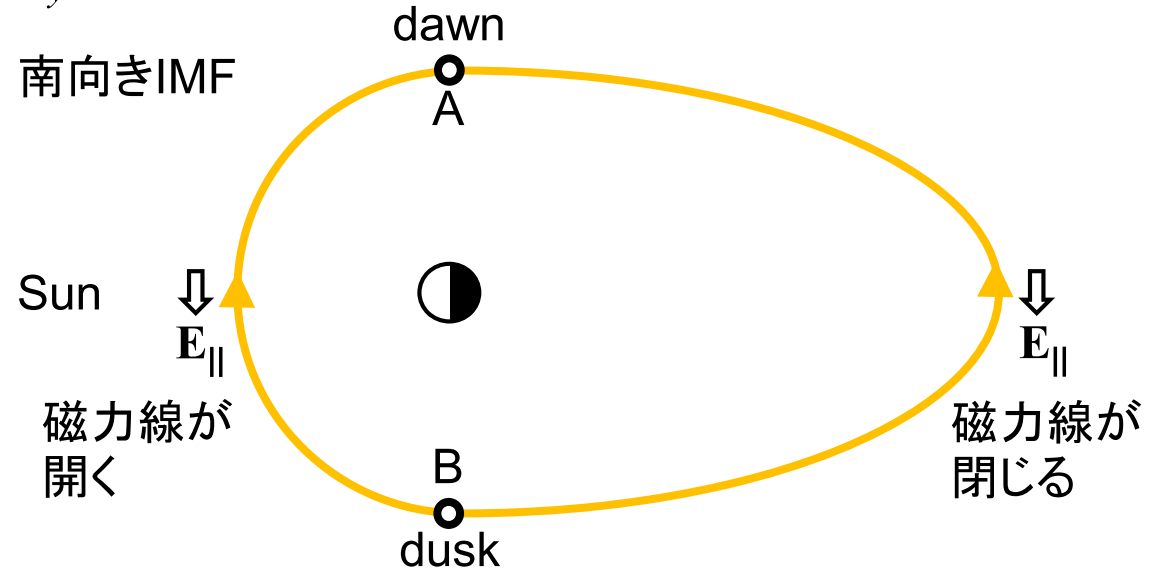




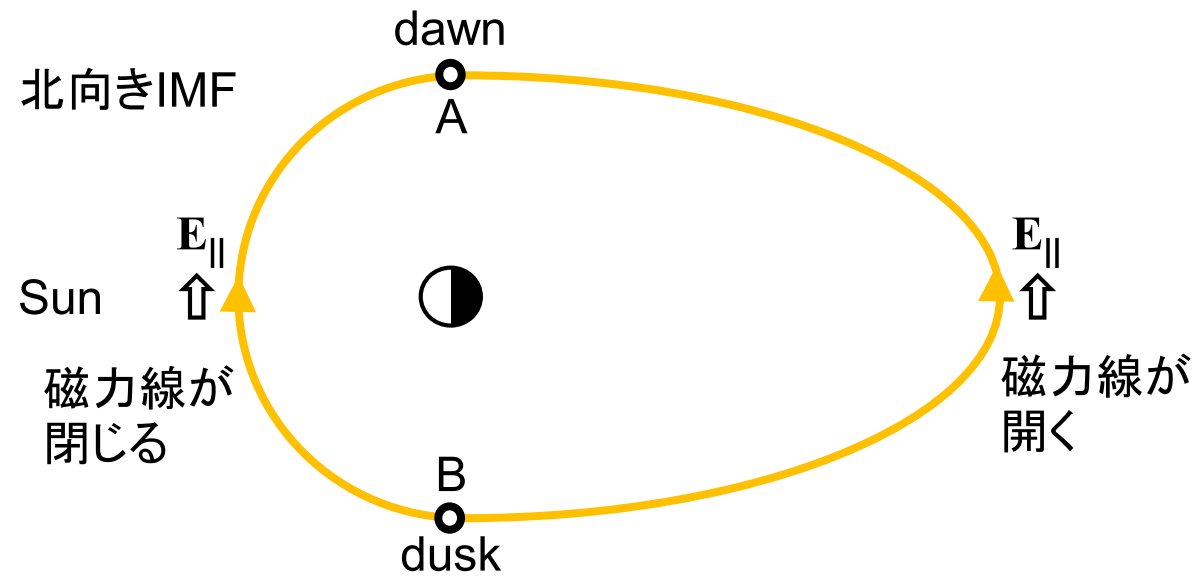
# Dungey型Rxはセパレーター上で起こる

$B_y < 0$ の場合

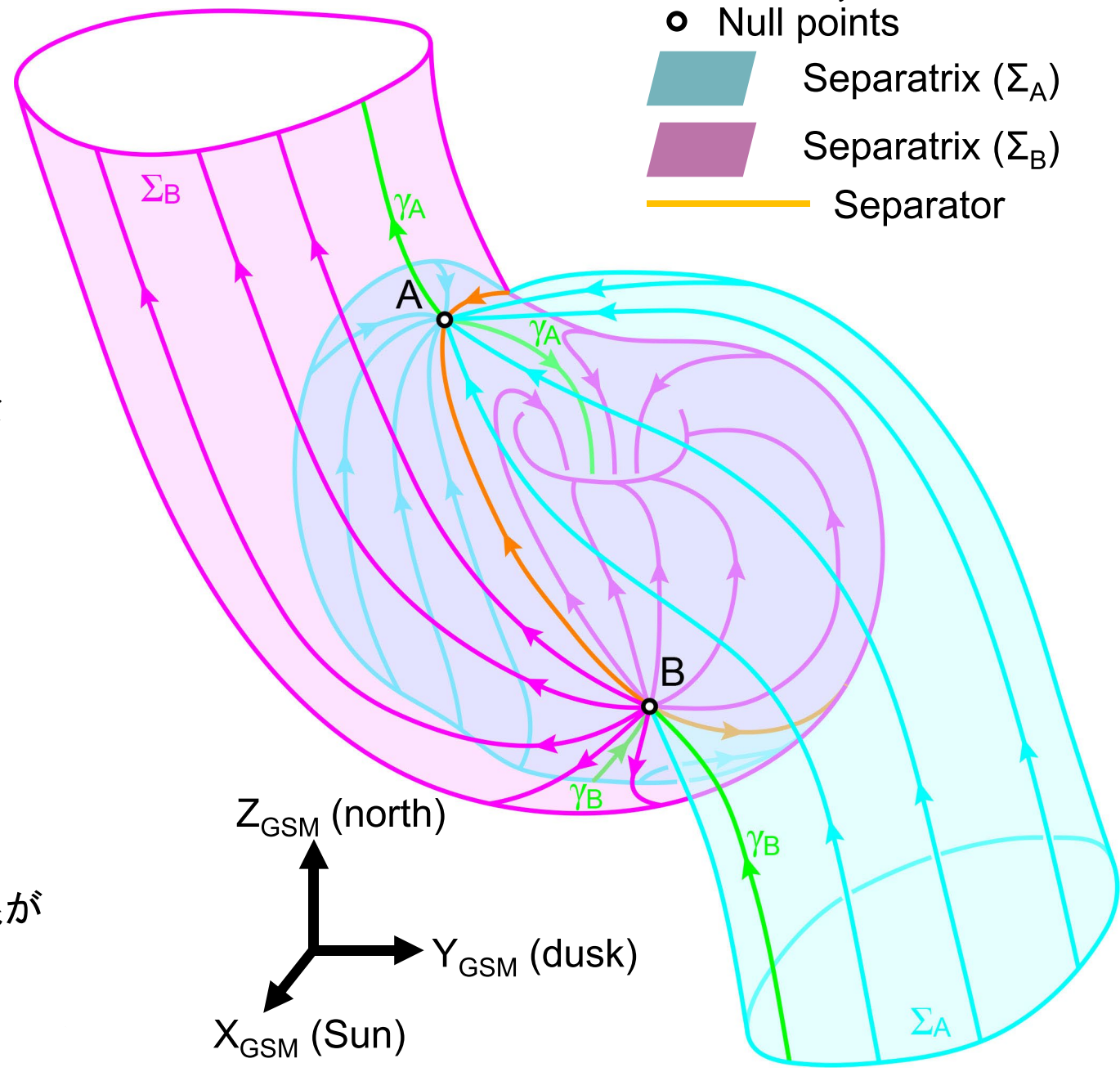
南向きIMF



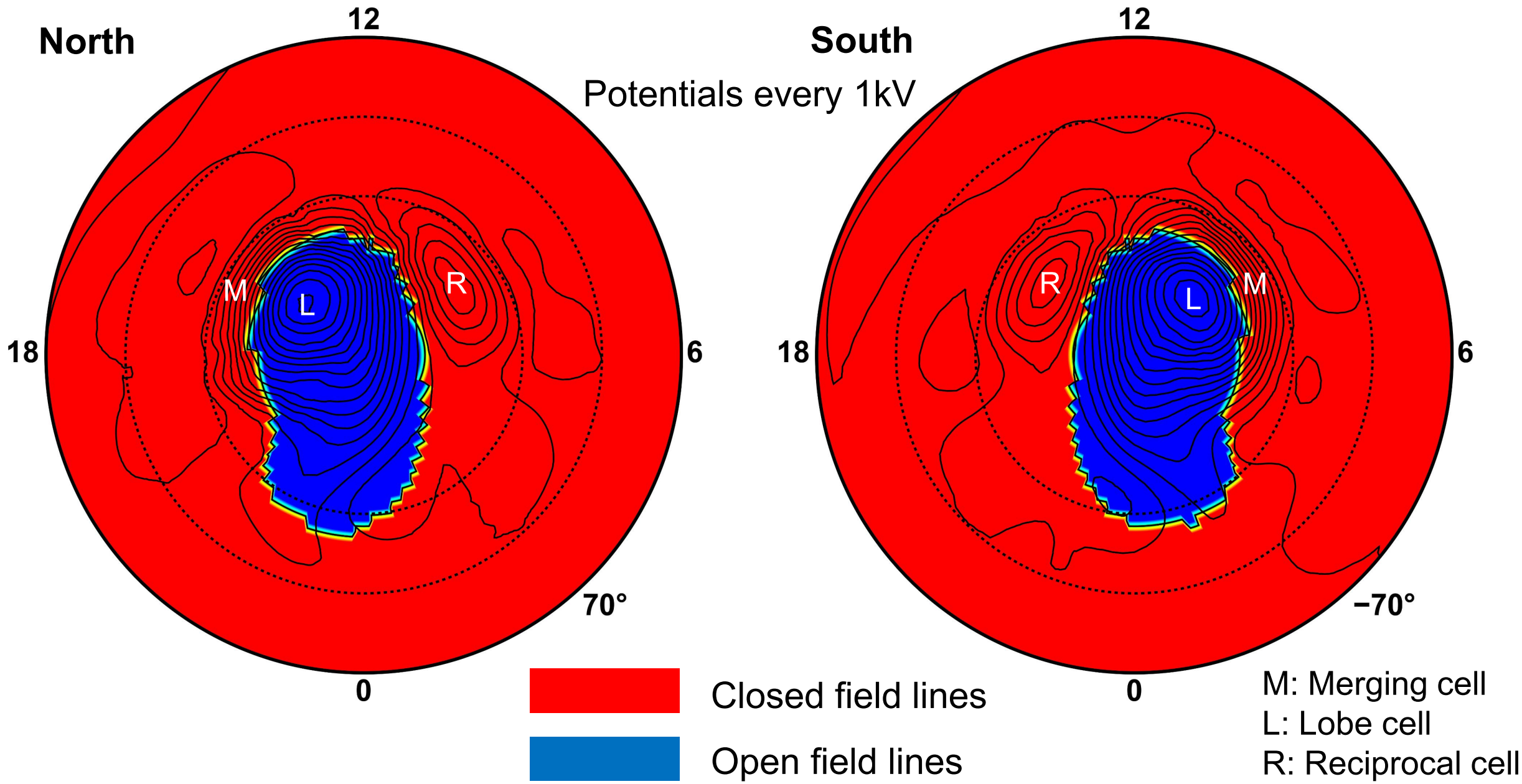
北向きIMF



# The 2-null, 2-separator structure ( $B_y < 0$ の場合)



# REPPU simulation: steady IMF with IMF $B=6\text{nT}$ and $\theta=-20^\circ$ ( $B_y < 0$ )



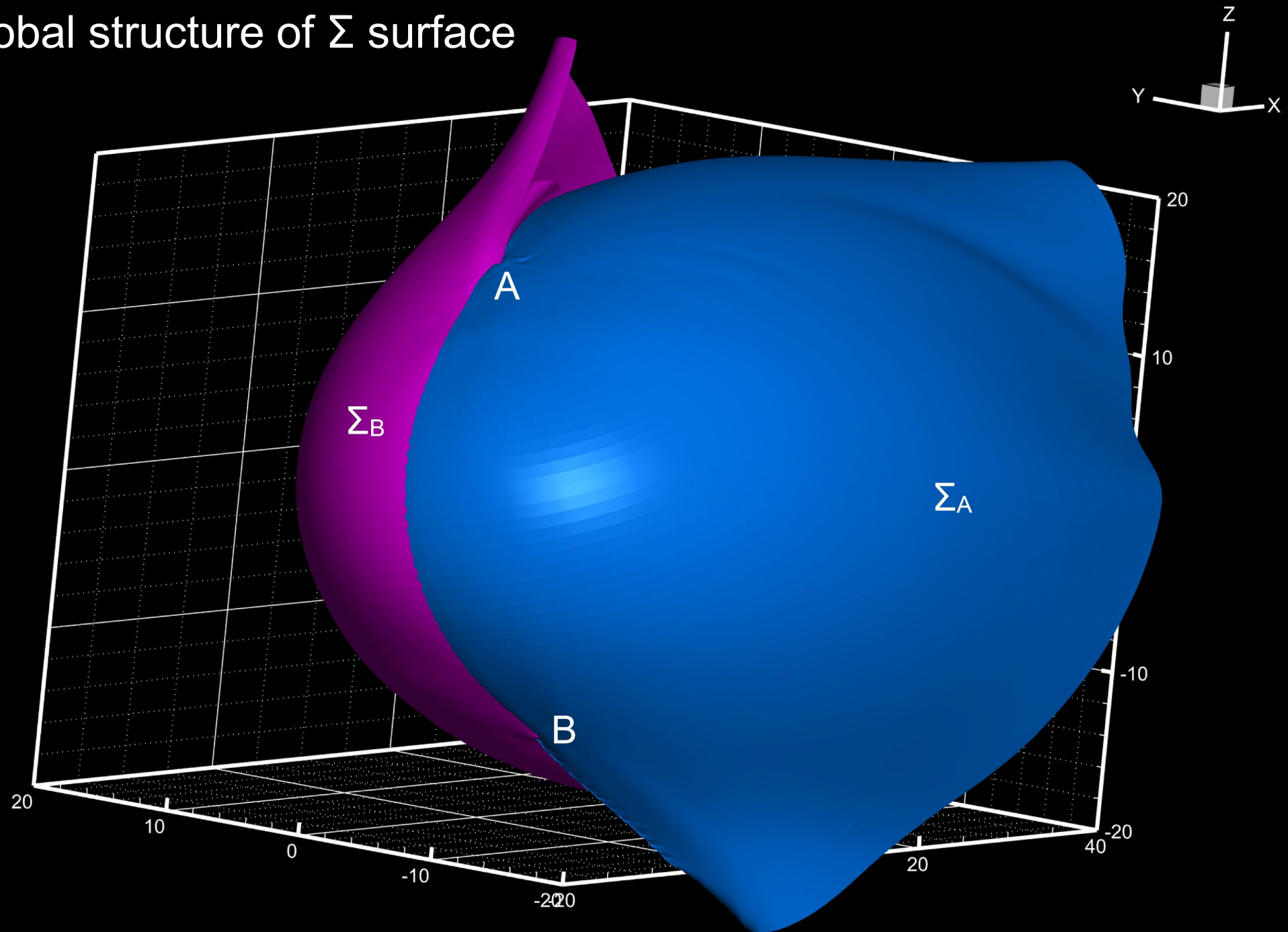
# Global structure of $\Sigma$ surface

Coordinates

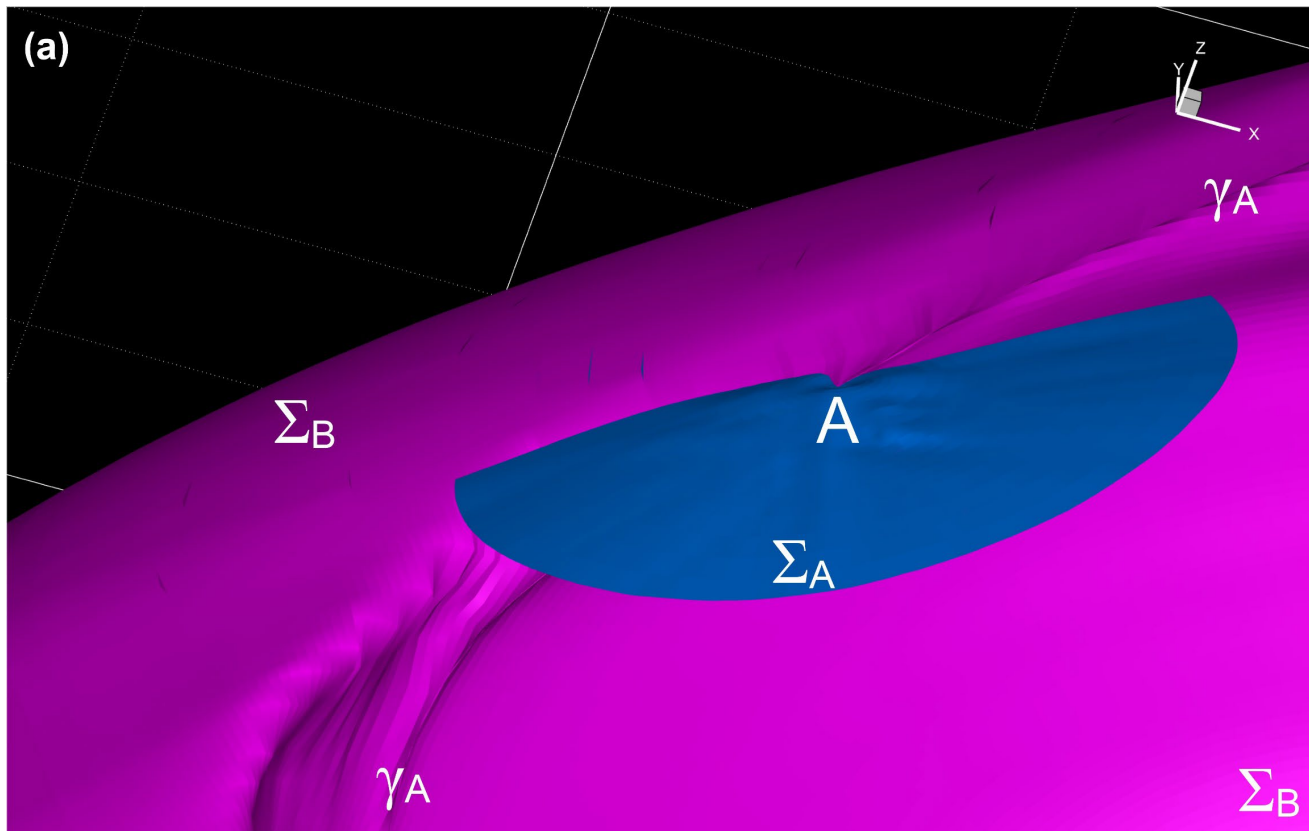
$$X = -X_{\text{GSM}}$$

$$Y = -Y_{\text{GSM}}$$

$$Z = Z_{\text{GSM}}$$



We examine  $\Sigma_A$  in the vicinity of A (northern null)

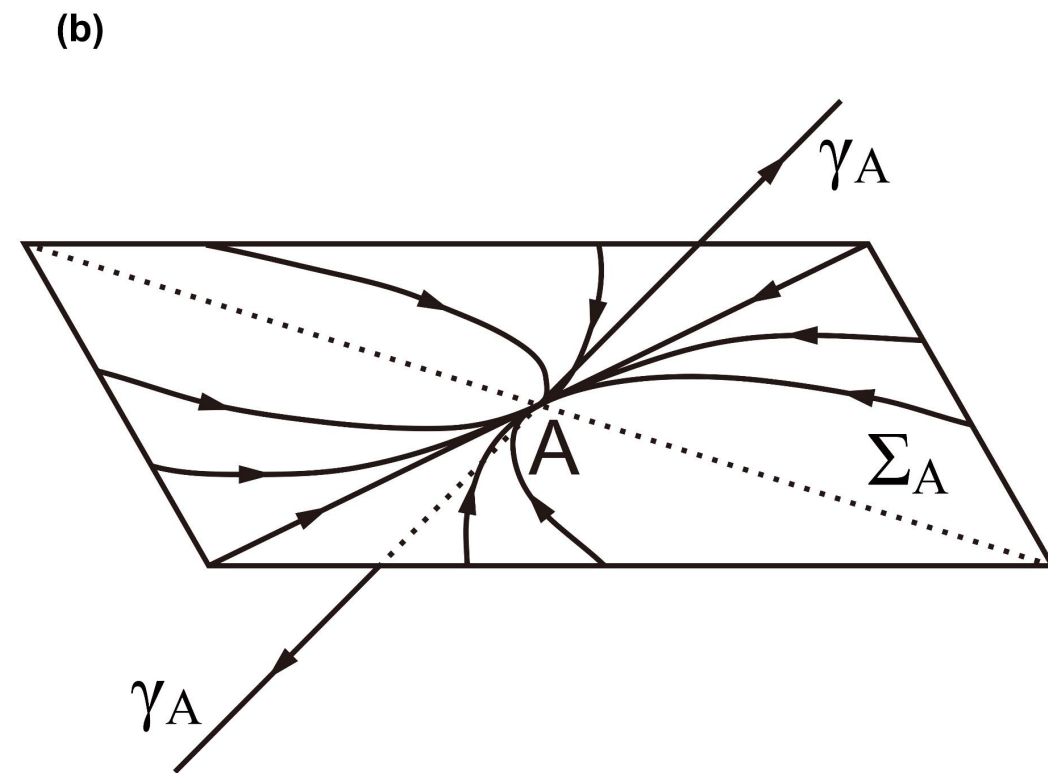


Coordinates

$$X = -X_{\text{GSM}}$$

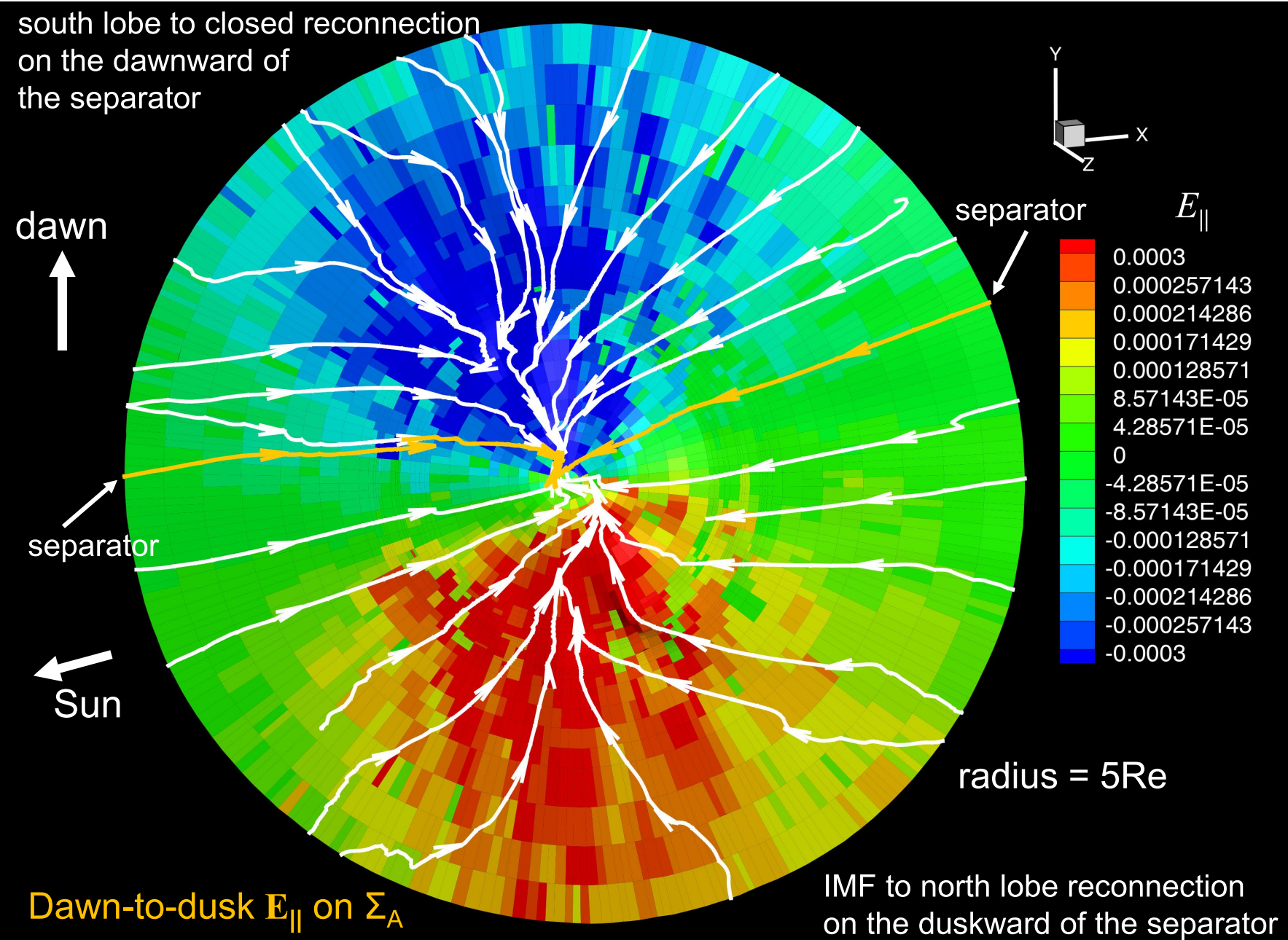
$$Y = -Y_{\text{GSM}}$$

$$Z = Z_{\text{GSM}}$$

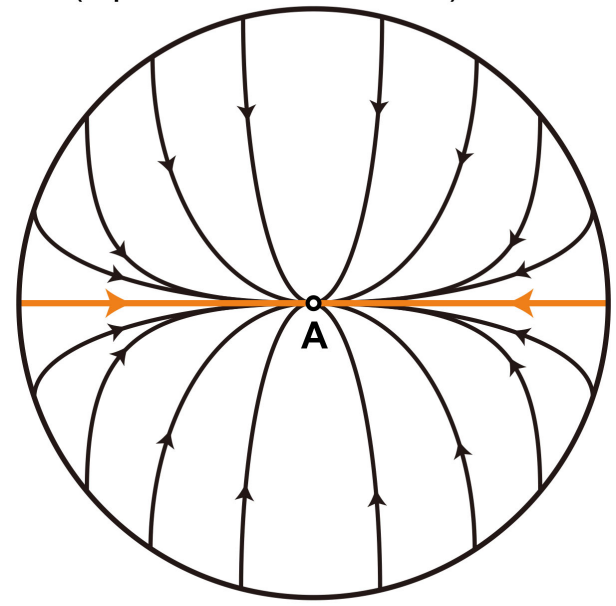




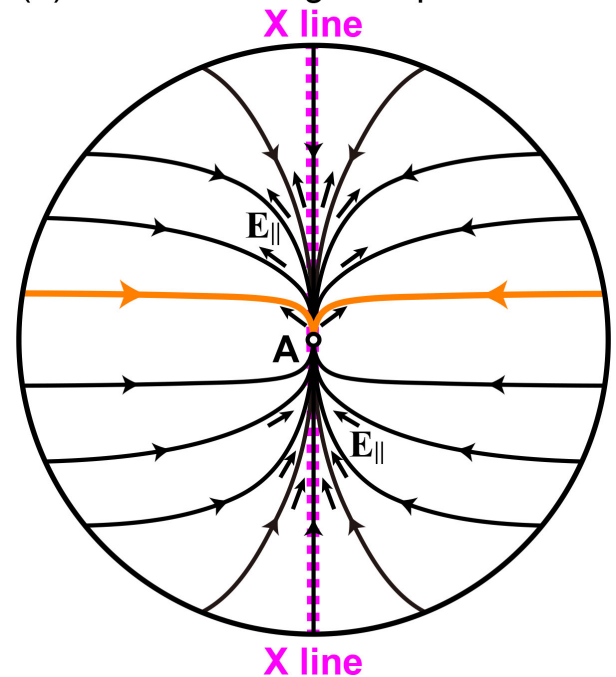
Field-aligned electric fields on  $\Sigma_A$  ( $X = -X_{GSM}, Y = -Y_{GSM}, Z = Z_{GSM}$ )



(a) Potential magnetic field (dipole + uniform fields)



(b) Simulated magnetosphere

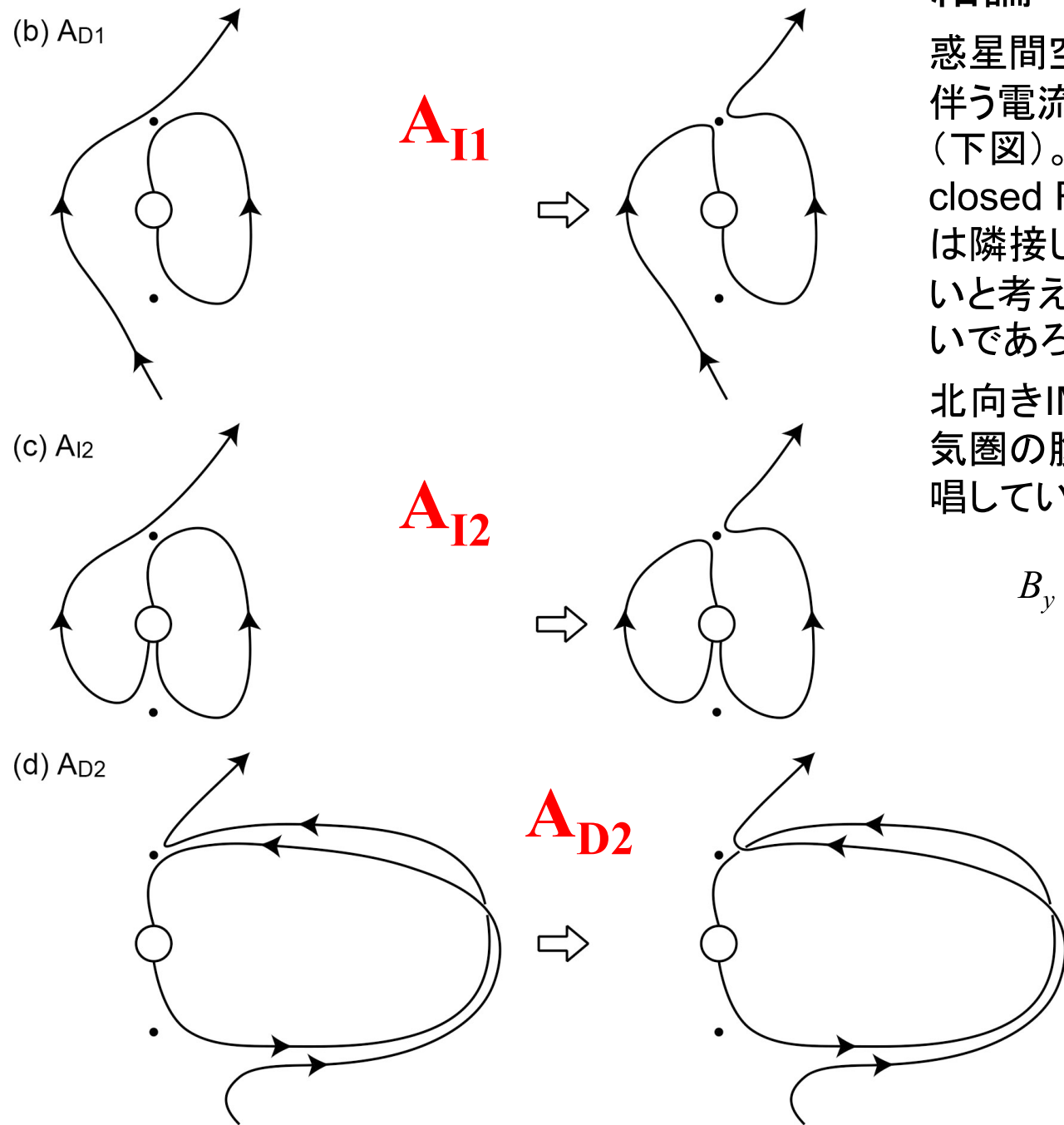




# 結論

惑星間空間磁場北向き時(特に真北に近い時)は、lobe-closed Rxに伴う電流により、零点近傍においてセパレータが朝夕方向に曲がる(下図)。これにより昼間側・夜側ともDungey型Rxが起こる。Lobe-closed Rx、昼間側Dungey Rx、夜側Dungey Rxの3者が起こる領域は隣接していて、違いはごくわずかである。実際には3者は区別できないと考えられる。拡散領域へ出入りする正味の磁束収支しか分からないであろう。

北向きIMF時のDungey型 Rxが起こる場所は零点近傍、すなわち磁気圏の腹( $X_{GSM} = 0$  程度)の高緯度であり、Leicester U groupが提唱しているような赤道域で起こるRxではない。



$B_y < 0$  の場合

磁力線が開く 磁力線が閉じる

Sun

