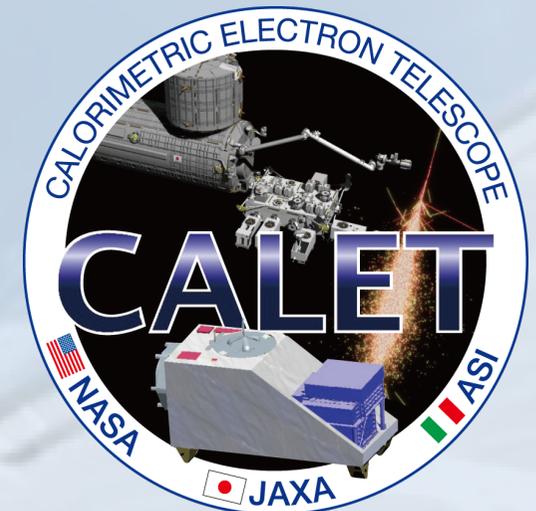


# CALETによる低エネルギー電子・陽子の 観測結果を用いた太陽変調モデルの構築

茨城高専, 極地研<sup>A</sup>, 信大理<sup>B</sup>, 早大理工総研<sup>C</sup>, 国立天文台<sup>D</sup>  
三宅晶子, 片岡龍峰<sup>A</sup>, 宗像一起<sup>B</sup>,  
高柚季乃<sup>B</sup>, 鳥居祥二<sup>C</sup>, 寺澤敏夫<sup>D</sup>,  
他CALETチーム



# CALETによる低エネルギー電子・陽子観測

## LEE shower trigger

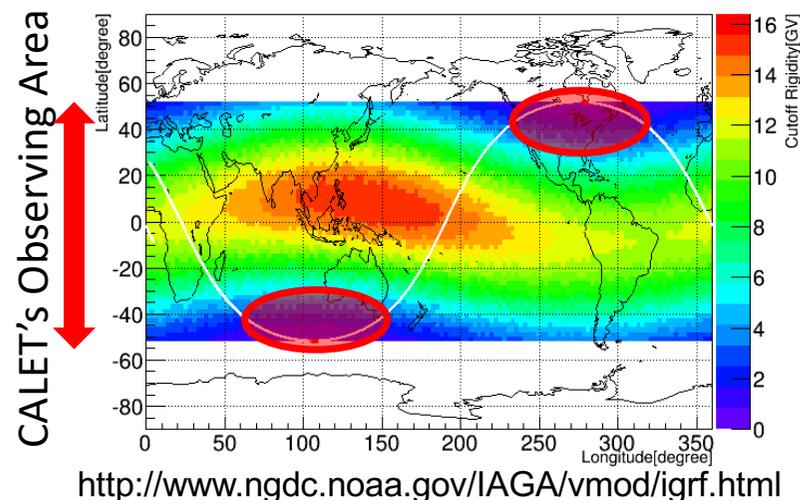
地磁気によるcutoff rigidityが約5.0GV以下の極領域 (ISSの周回軌道中、南北それぞれで90秒) において実施される、エネルギー閾値1.0GeVのトリガーモードで検出したイベントを解析

## 全電子・陽子のイベント選別条件

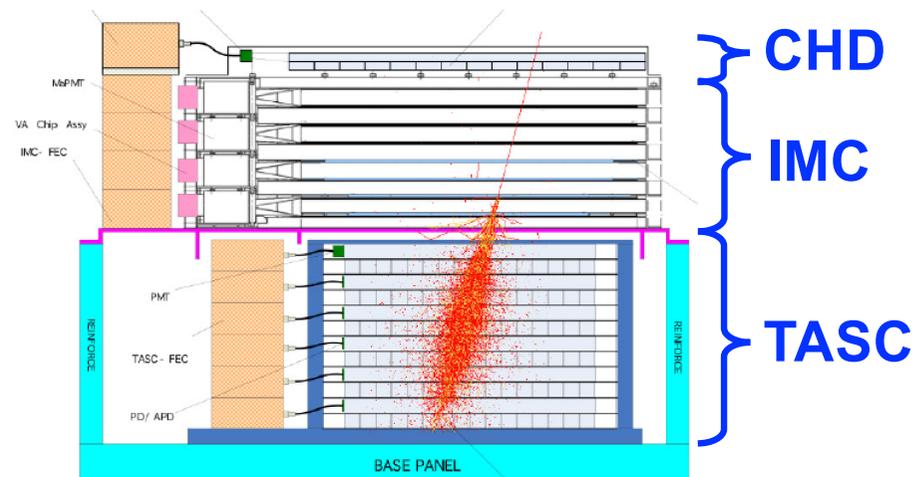
- Offline Trigger
- 飛跡再構成の精度
- 飛跡の幾何条件
- CHDでのenergy deposit
- IMC最下層でのenergy deposit やシャワー集中度
- TASC最上層でのシャワーの横広がり
- IMC, TASCでのenergy deposit (エネルギー再構成)

以上の選別を実施することで、低エネルギー全電子・陽子を取得

Cutoff rigidity map and ISS orbit



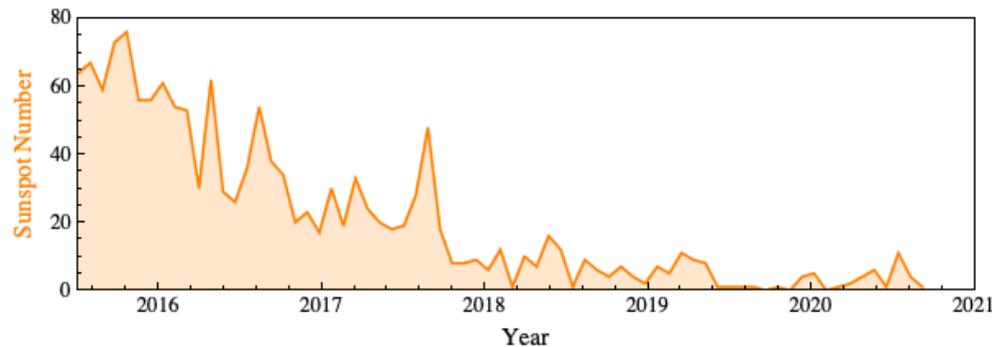
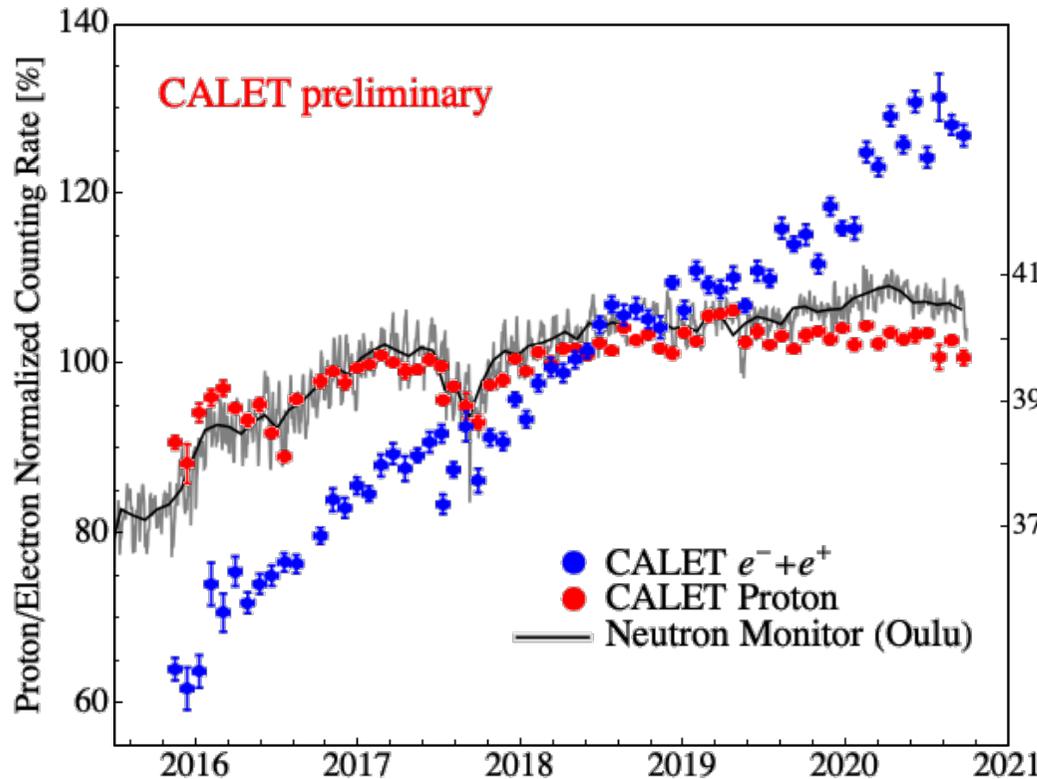
CALET Calorimeter



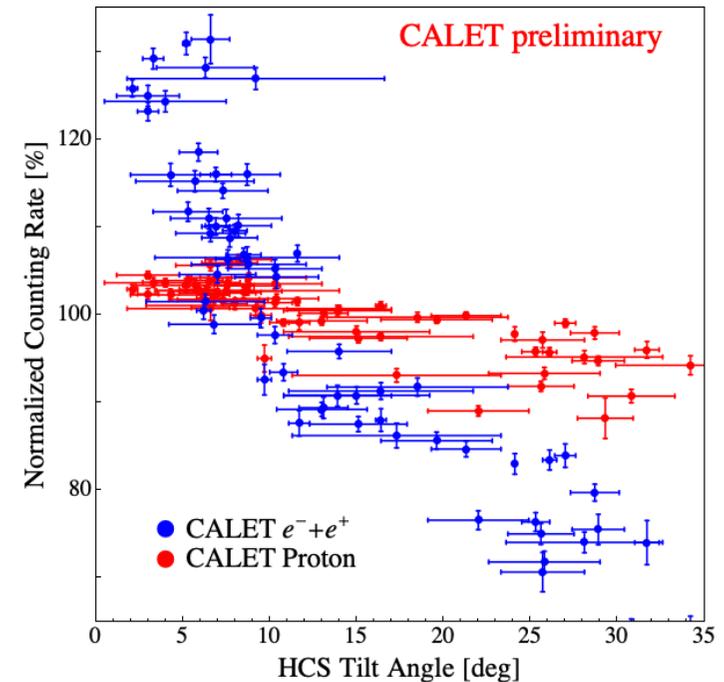
# CALETによる低エネルギー電子・陽子観測

## 平均Rigidity3.8GVの全電子・陽子計数率

全電子・陽子計数率の時間変化



全電子・陽子計数率と  
HCSの傾きの相関

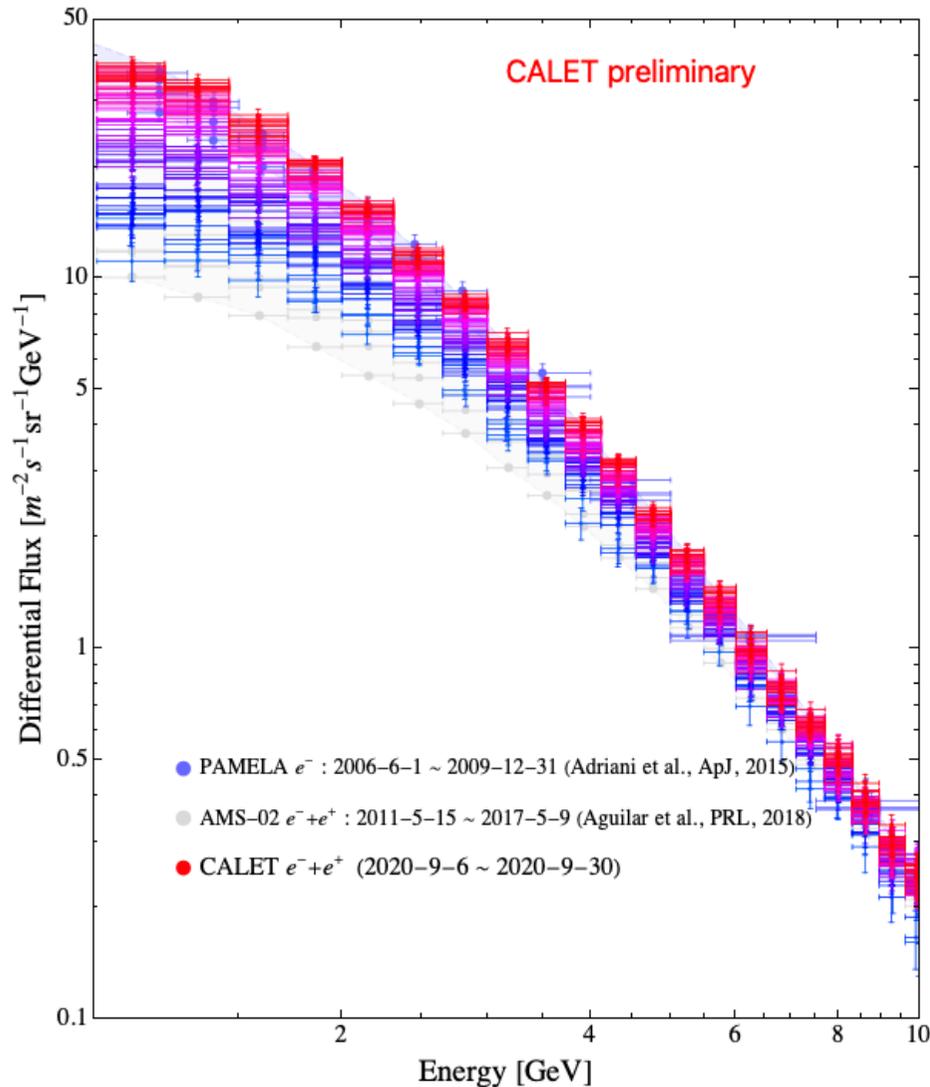


陽子に比べて全電子の計数率の変動幅が大きく、また惑星間空間磁場の磁気中性面(HCS)の傾きとの相関が強い。

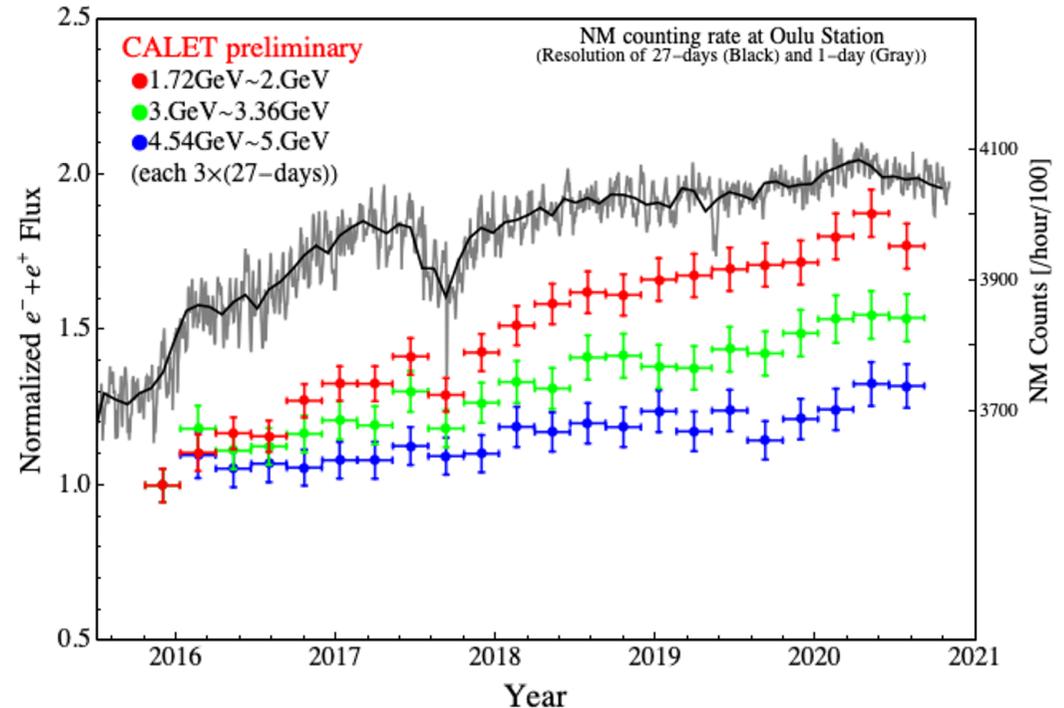
# CALETによる低エネルギー電子・陽子観測

## 1-10GeV 全電子フラックス

全電子エネルギースペクトル



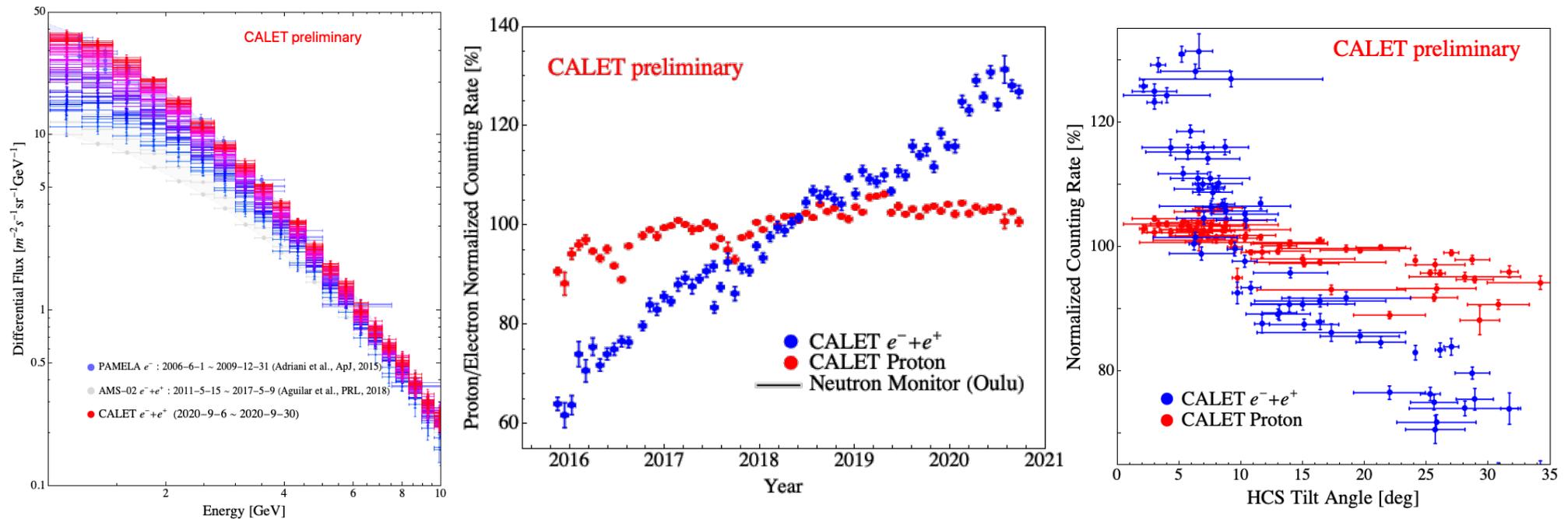
全電子フラックスの時間変化



- 全電子フラックスの増大が2020年5月頃まで継続し、前回の太陽活動極小期におけるPAMELAの観測値に匹敵する高フラックスを検出
- 現在はフラックスの低下が継続中

# CALETの観測結果を用いた太陽変調モデルの構築

## CALETによる低エネルギー全電子・陽子の観測結果



CALETの観測した太陽活動約半周期にわたる全電子フラックスおよび全電子・陽子計数率を用いて、観測を再現する太陽変調モデルを構築

- CALETの観測した低エネルギー全電子・陽子計数率の荷電依存性を、太陽変調のドリフトモデルで再現できるか？
- CALETの観測した低エネルギー全電子のエネルギースペクトルを、太陽変調のドリフトモデルと銀河系内における宇宙線伝播から推定される標準的な局所星間空間エネルギースペクトル(LIS)で再現できるか？

# 太陽変調モデル

- 移流拡散方程式に等価な確率微分方程式に基づく3次元数値シミュレーション

## 確率微分方程式 (SDE)

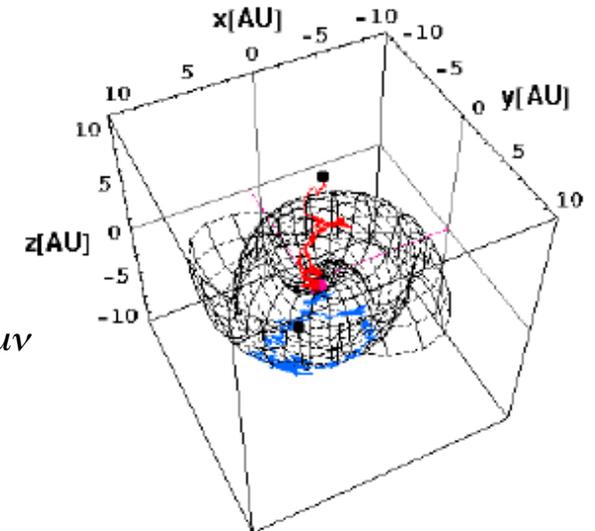
(Yamada et al., GRL, 1998)  
(Zhang, ApJ, 1999)

$$\begin{cases} d\mathbf{r} = (\nabla \cdot \mathbf{K} + V_{sw} + V_{drift}) dt + \sum_s \alpha_s dW_s(t) \\ dp = -\frac{1}{3} p (\nabla \cdot \mathbf{V}) dt \end{cases}$$

$\mathbf{r} = (x, y, z)$ : position of pseudo particle  $\sum_{\sigma} \alpha_{\sigma}^{\mu} \alpha_{\sigma}^{\nu} = 2K^{\mu\nu}$

$dW_{\sigma}(t)$ : Wiener process given by a Gaussian distribution

SDEによる宇宙線の  
Backward Trace



# 太陽変調モデル

- 移流拡散方程式に等価な確率微分方程式に基づく3次元数値シミュレーション

## 拡散係数 (Miyake, ICRC, 2017)

$$\kappa_{\parallel} = \kappa_0 \beta \left( \frac{p}{1 \text{ GeV}/c} \right) \left( \frac{B_{1\text{AU}}}{B} \right)$$

$$\kappa_{\perp\theta} = 0.01 \kappa_0 \beta \left( \frac{p}{1 \text{ GeV}/c} \right) \left( \frac{B_{1\text{AU}}}{B} \right) \eta(\theta)$$

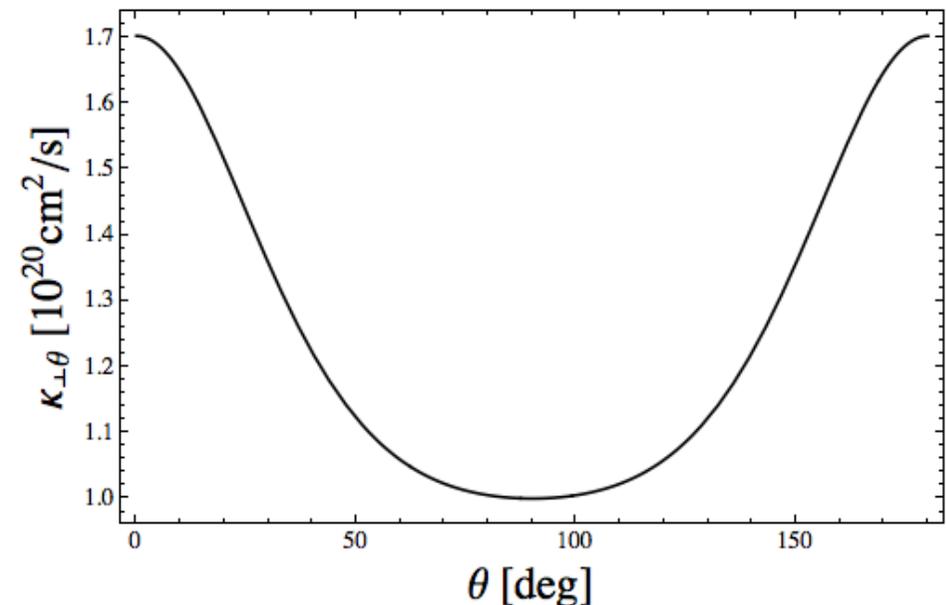
$$\kappa_{\perp 2} = 0.02 \kappa_0 \beta \left( \frac{p}{1 \text{ GeV}/c} \right) \left( \frac{B_{1\text{AU}}}{B} \right)$$

$$\kappa_0 = 1 \times 10^{22} [\text{cm}^2/\text{s}]$$

$$\eta(\theta) = \eta_P - (\eta_P - \eta_e) \sin^2 \theta \quad \begin{cases} \eta_P = 1.4 \\ \eta_e = 0.6 \end{cases}$$

## 拡散係数 $\kappa_{\perp\theta}$ の緯度依存性

$\kappa_{\perp\theta}$  ( $r=1\text{AU}$ ,  $p=1\text{GeV}/c$ )



# 太陽変調モデル

- 移流拡散方程式に等価な確率微分方程式に基づく3次元数値シミュレーション
- 乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果の有無を考慮

## ドリフト運動

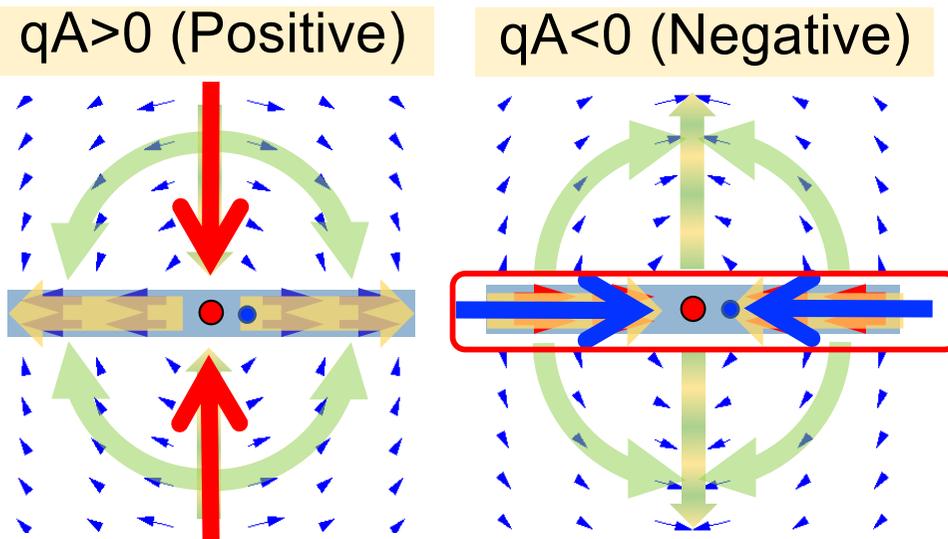
$$\langle v_D \rangle = \nabla \times \left( \kappa_A \frac{B}{|B|} \right)$$

$$\kappa_A = \frac{v R_L}{3} f_{\text{red}}$$

$$f_{\text{red}} = \frac{1}{1 + 0.42 \left( \frac{\delta B}{B_e} \right)^{2.7}}$$

$$\left( \frac{\delta B}{B_e} \right)^2 = \left( \frac{r}{1 \text{AU}} \right)^{-2.4}$$

太陽圏内での銀河宇宙線のドリフトパターン



HCSドリフト速度: HCSとの距離に依存する近似関数  
(Burger and Potgieter, 1989)

# 太陽変動モデル

- 移流拡散方程式に等価な確率微分方程式に基づく3次元数値シミュレーション
- 乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果の有無を考慮

## ドリフト運動

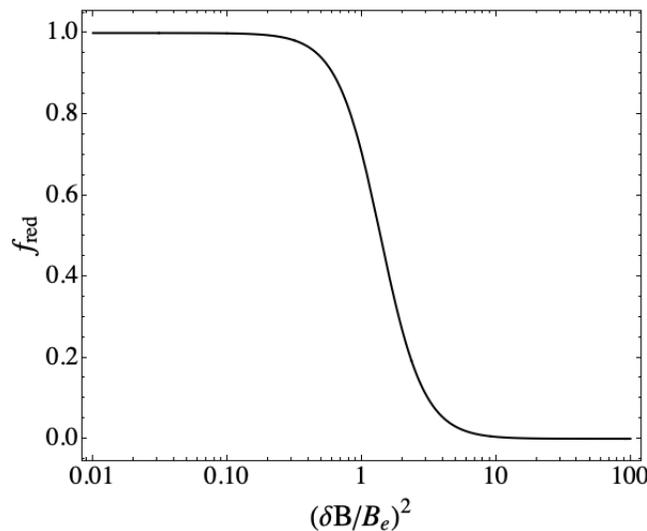
$$\langle v_D \rangle = \nabla \times \left( \kappa_A \frac{B}{|B|} \right)$$

$$\kappa_A = \frac{v R_L}{3} f_{\text{red}}$$

$$f_{\text{red}} = \frac{1}{1 + 0.42 \left( \frac{\delta B}{B_e} \right)^{2.7}}$$

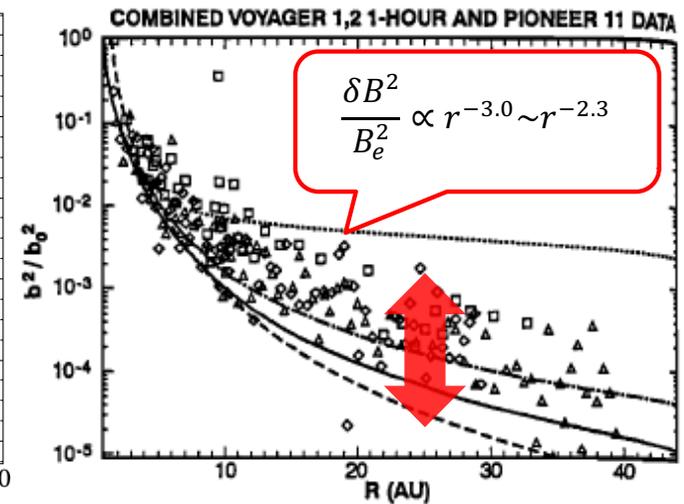
$$\left( \frac{\delta B}{B_e} \right)^2 = \left( \frac{r}{1 \text{AU}} \right)^{-2.4}$$

### 乱流磁場による減衰



(Tautz and Shalchi, ApJ, 2012)

### $\delta B$ の $r$ 依存性



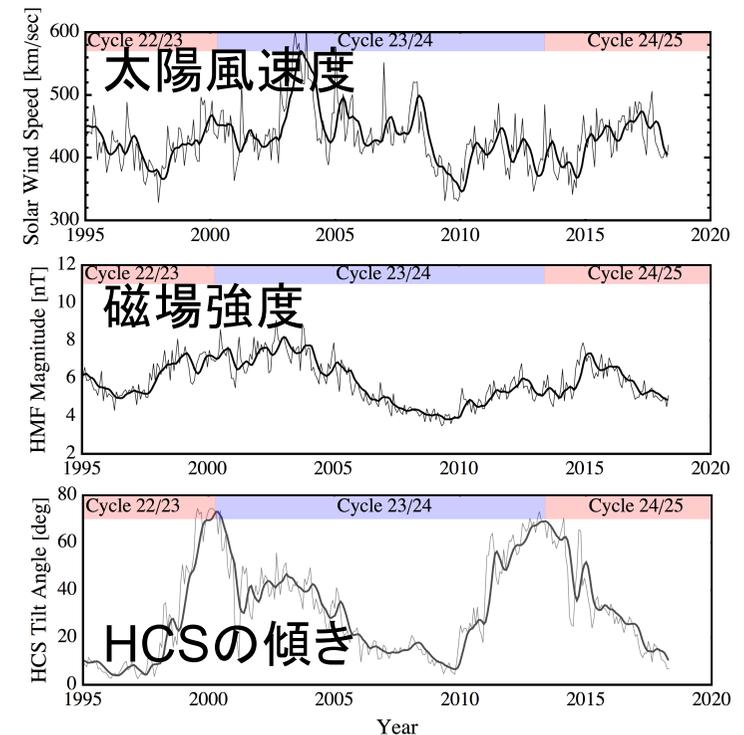
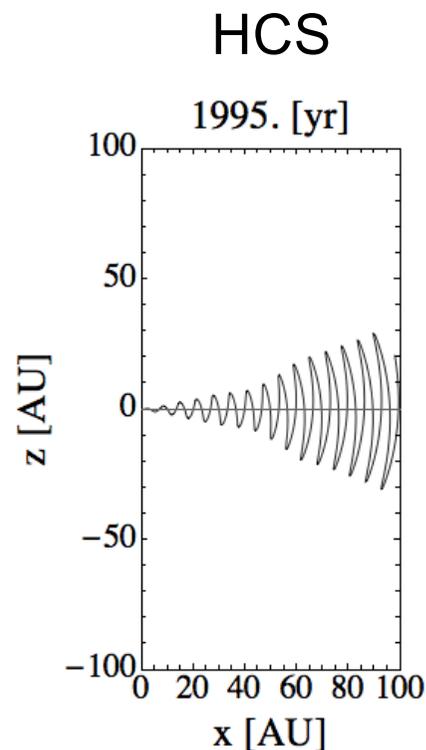
(Zank et al., JGR, 1996)

# 太陽変調モデル

- 移流拡散方程式に等価な確率微分方程式に基づく3次元数値シミュレーション
- 乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果の有無を考慮
- 観測に基づく太陽風速度や惑星間空間磁場の変動を考慮

## 太陽圏の環境

- 一様等方な太陽風速度
- パーカースパイラル惑星間空間磁場
- HCSの傾きの変化を考慮したHCSの構造



(OMNI Web, WSO)

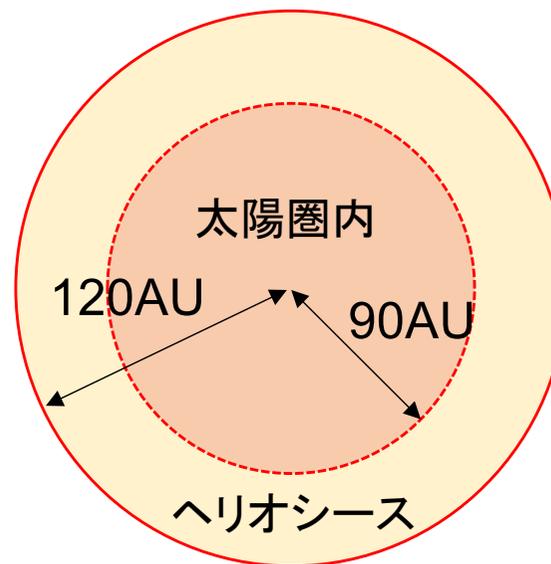
# 太陽変調モデル

- 移流拡散方程式に等価な確率微分方程式に基づく3次元数値シミュレーション
- 乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果の有無を考慮
- 観測に基づく太陽風速度や惑星間空間磁場の変動を考慮
- 太陽圏内部+ヘリオシースでの宇宙線伝播

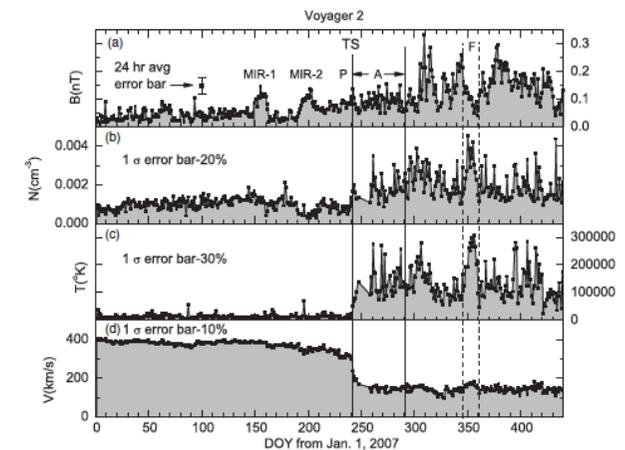
## 太陽圏の構造、LIS

- 90AUで太陽風終端衝撃波(HTS)による太陽風速度と磁場強度の変化を考慮
- ヘリオシースは120AUまで等方的に広がると仮定

太陽圏の構造



HTS前後の変化



(Burlaga et al., ApJ, 2009)

ヘリオシースでは、以下を仮定

- 太陽風速度は1/2.6倍
- 磁場強度は2.5倍

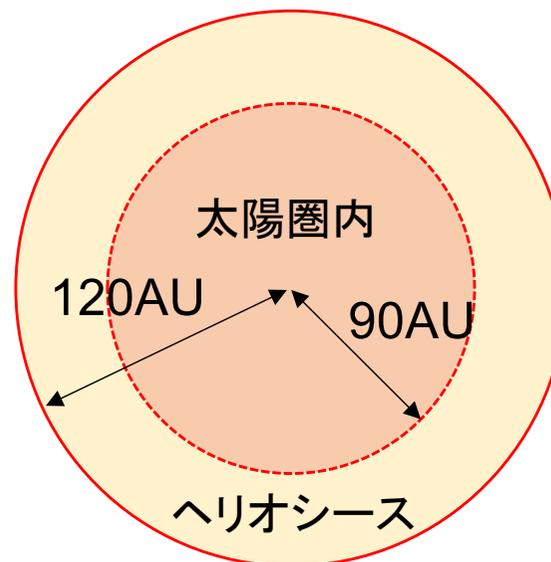
# 太陽変調モデル

- 移流拡散方程式に等価な確率微分方程式に基づく3次元数値シミュレーション
- 乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果の有無を考慮
- 観測に基づく太陽風速度や惑星間空間磁場の変動を考慮
- 太陽圏内部+ヘリオシースでの宇宙線伝播

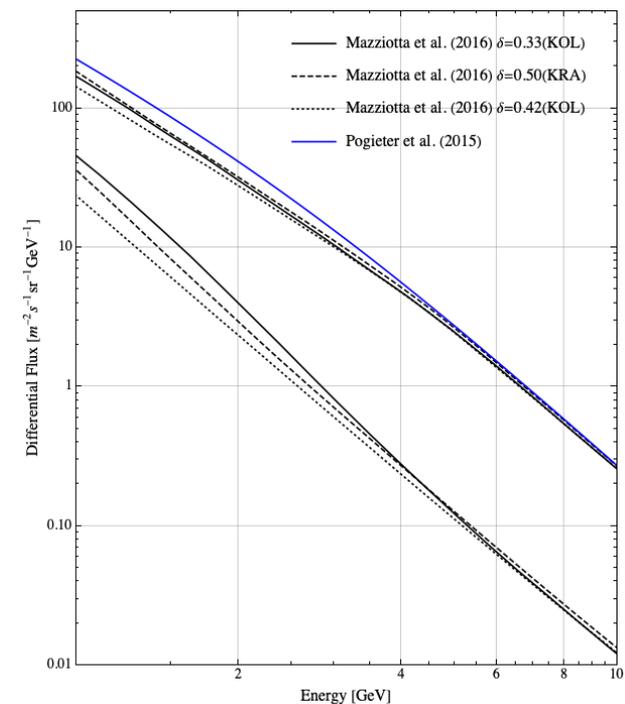
## 太陽圏の構造、LIS

- 90AUで太陽風終端衝撃波(HTS)による太陽風速度と磁場強度の変化を考慮
- ヘリオシースは120AUまで等方的に広がると仮定

太陽圏の構造



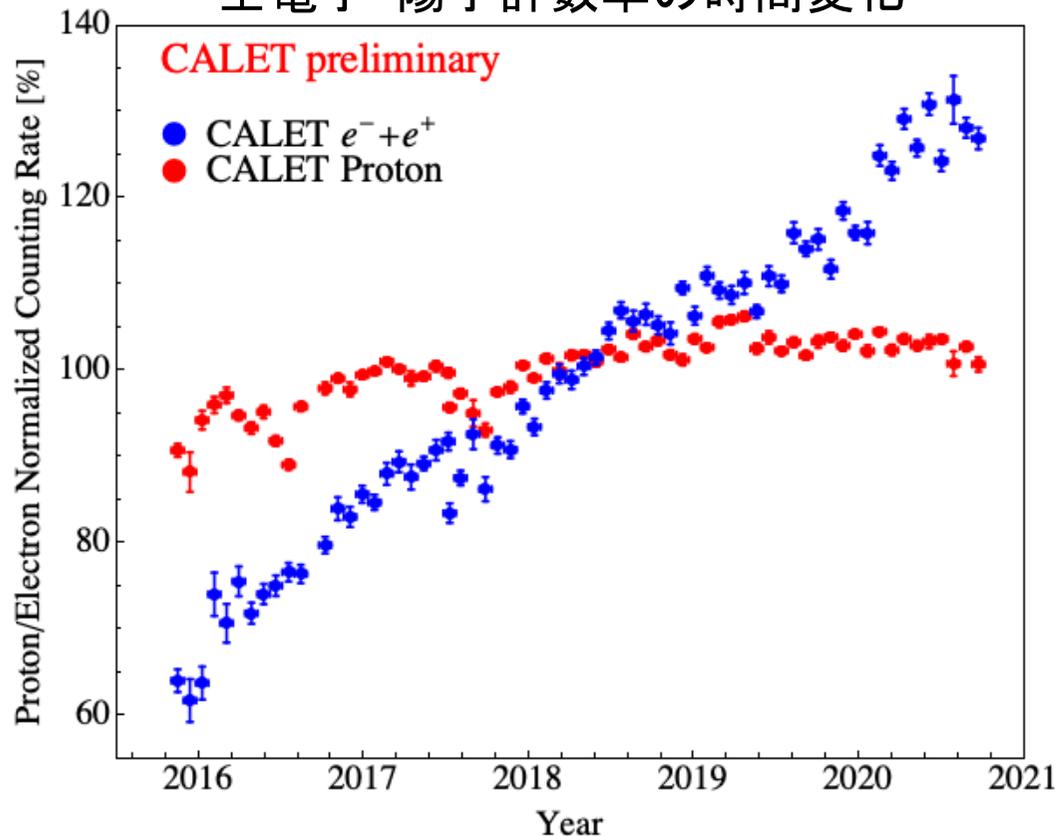
電子・陽電子のLIS



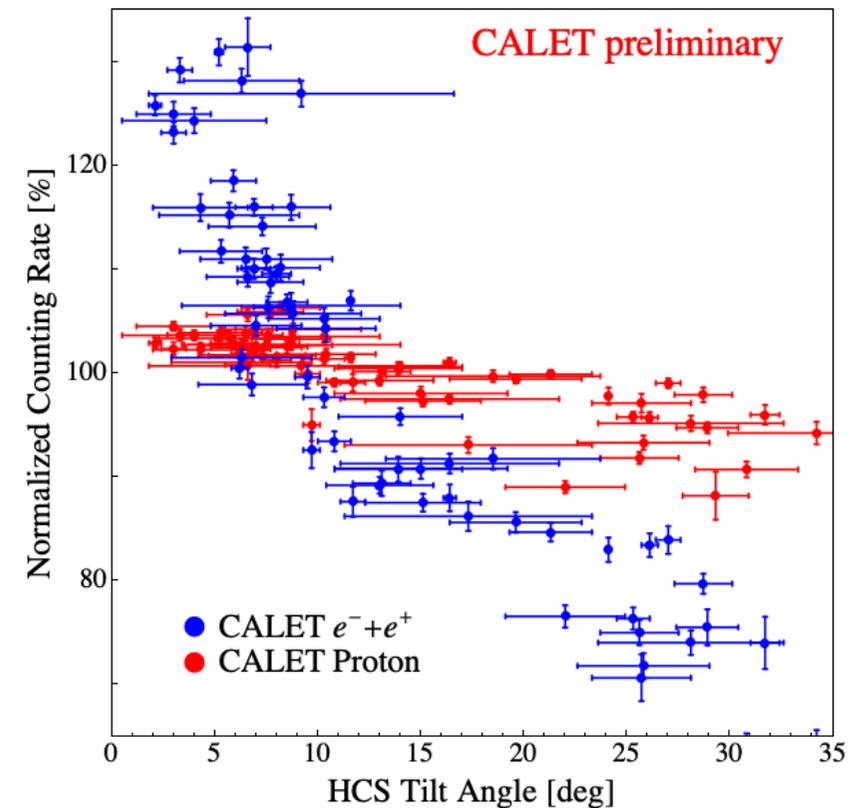
# 計算結果：荷電依存性

## 乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果を考慮しない場合 ( $f_{red} = 1$ )

全電子・陽子計数率の時間変化



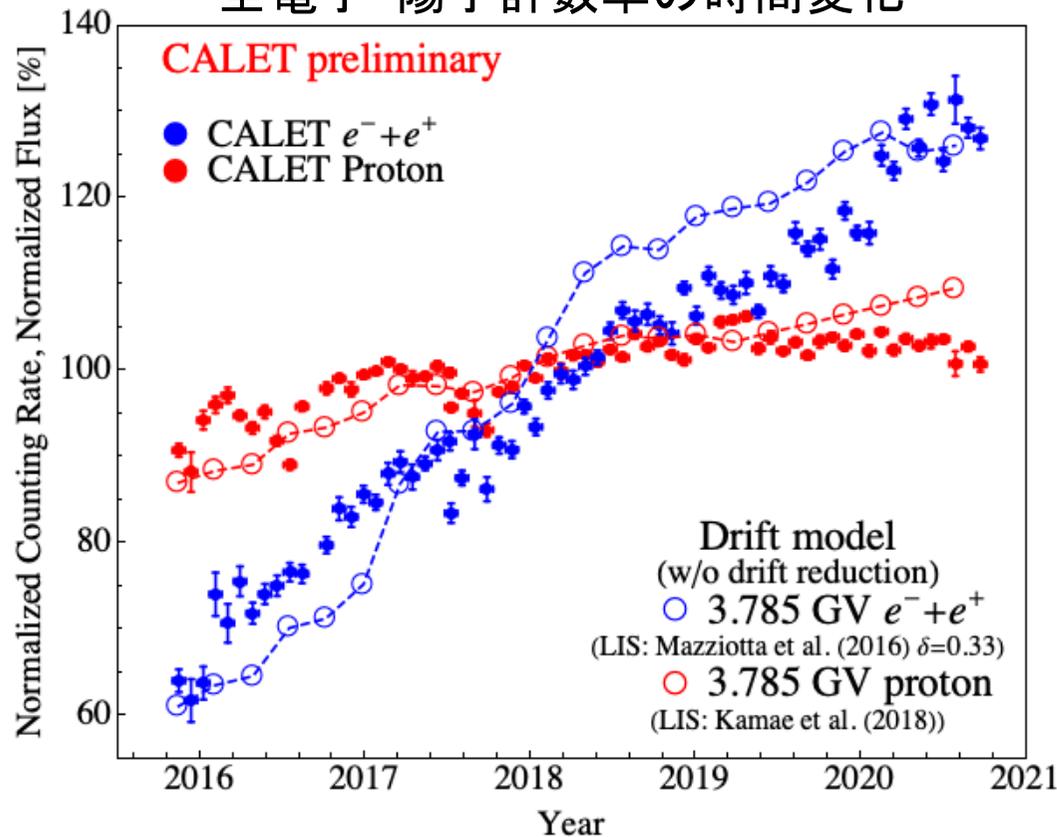
全電子・陽子計数率とHCSの傾きの相関



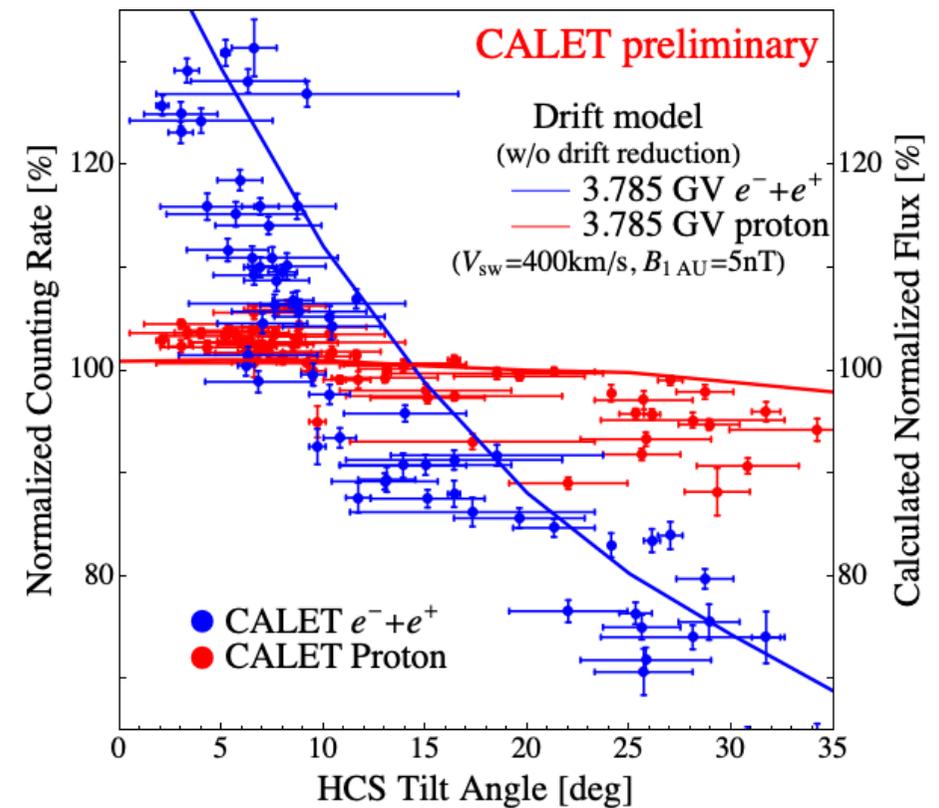
# 計算結果：荷電依存性

## 乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果を考慮しない場合 ( $f_{red} = 1$ )

全電子・陽子計数率の時間変化



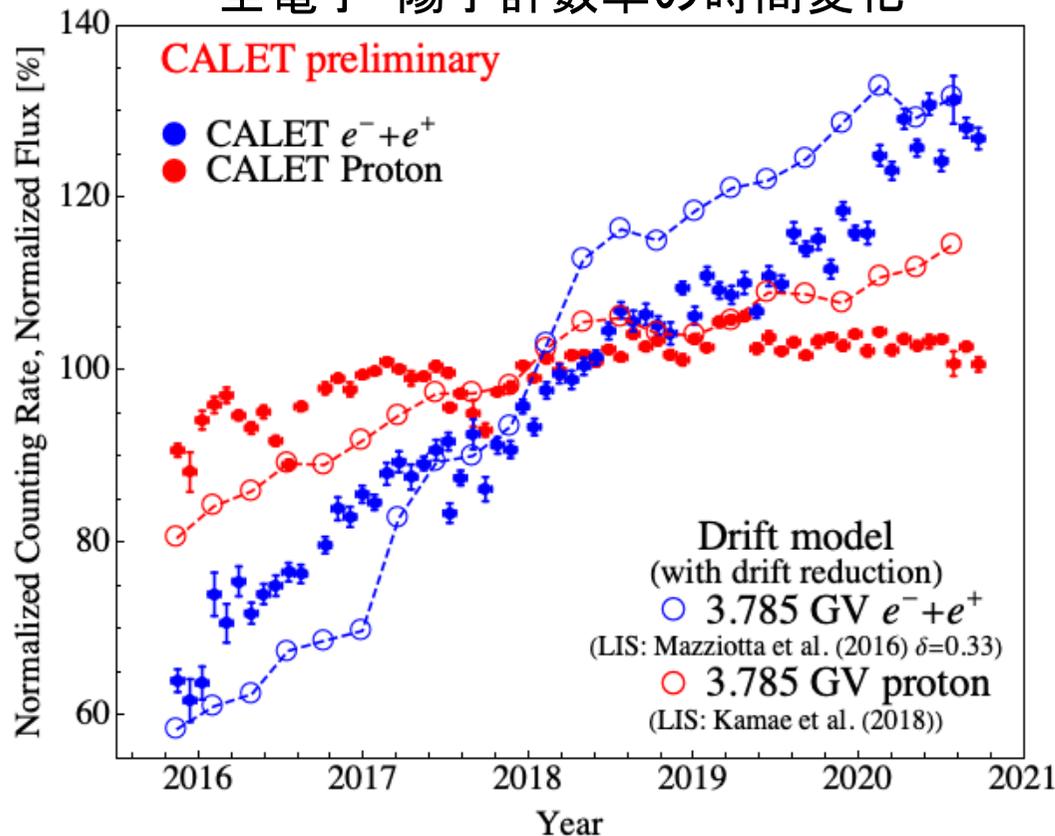
全電子・陽子計数率とHCSの傾きの相関



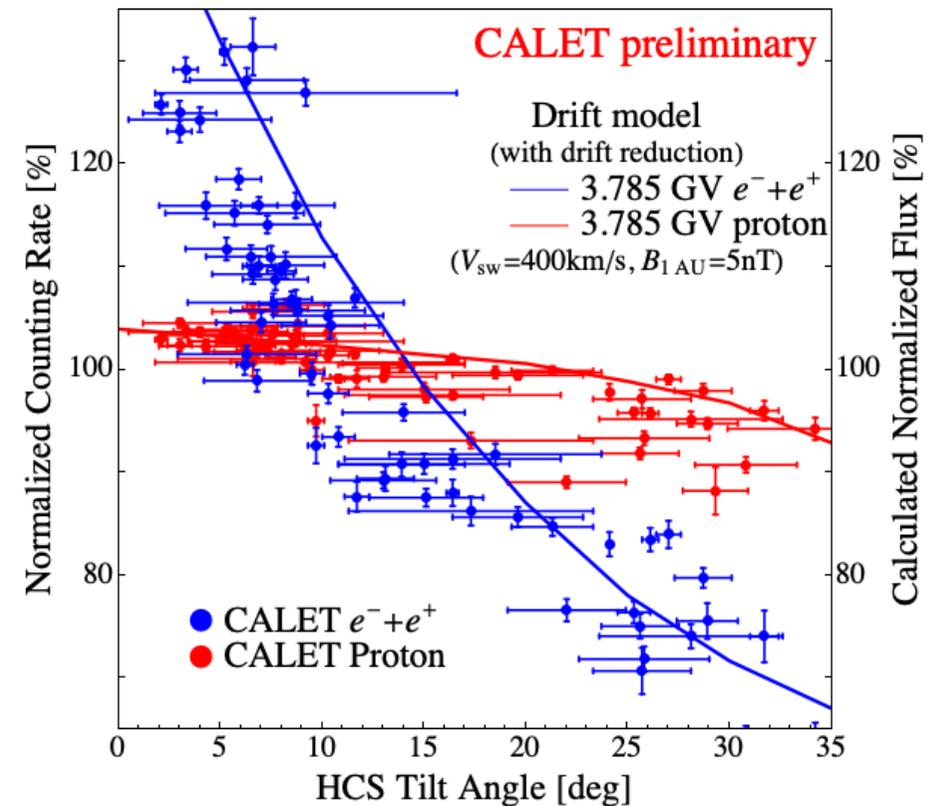
# 計算結果：荷電依存性

## 乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果を考慮した場合 ( $f_{red} \neq 1$ )

全電子・陽子計数率の時間変化



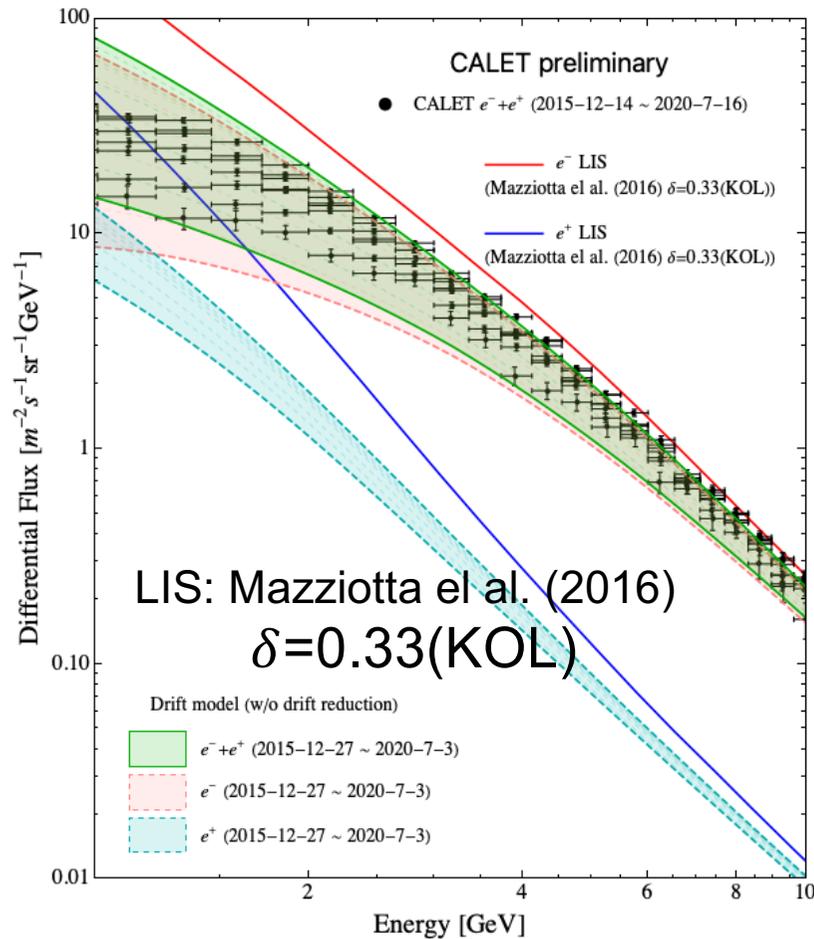
全電子・陽子計数率とHCSの傾きの相関



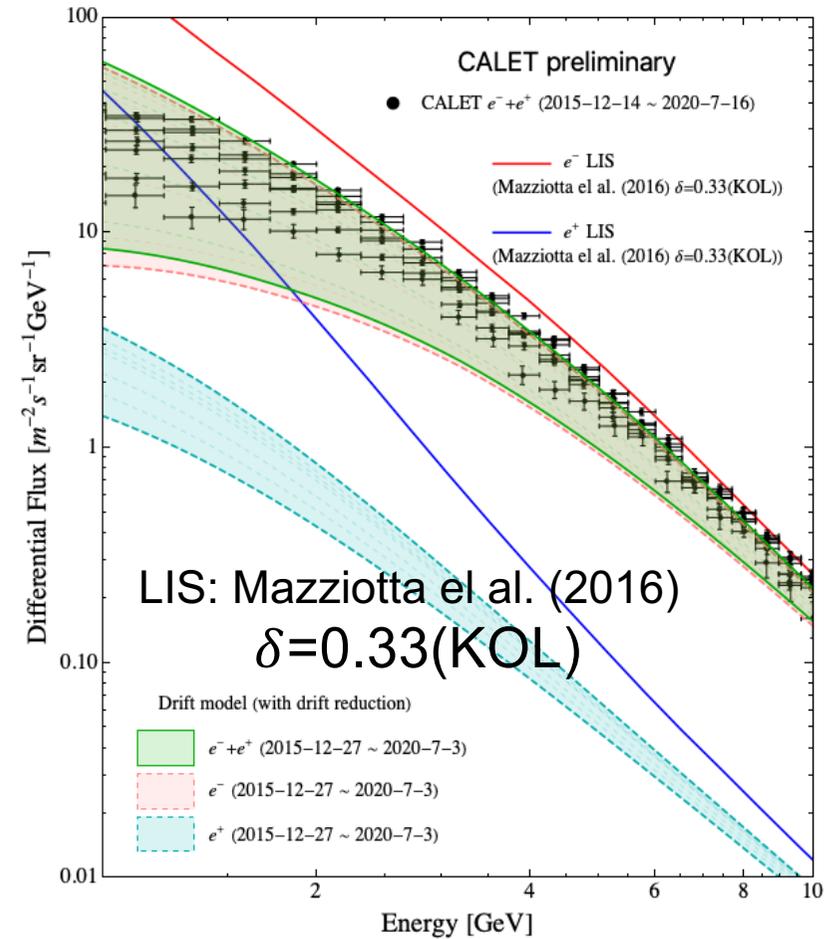
- ドリフト運動の減衰効果により、全電子・陽子ともにフラックスの変動幅が若干大きくなり、荷電依存性が弱まる
- 定性的な範囲に留まるが、本数値計算モデル(ドリフトモデル)でCALETの観測した低エネルギー電子・陽子の荷電依存性を再現

# 計算結果：全電子エネルギースペクトル

乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果を考慮しない場合 ( $f_{red} = 1$ )

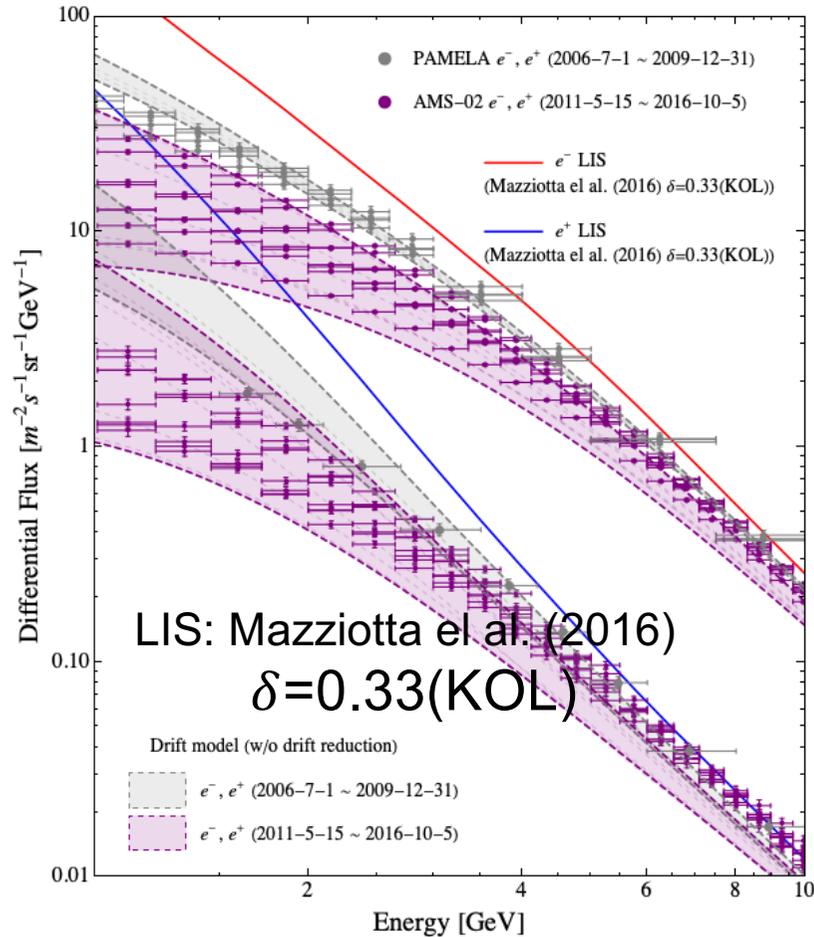


乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果を考慮した場合 ( $f_{red} \neq 1$ )

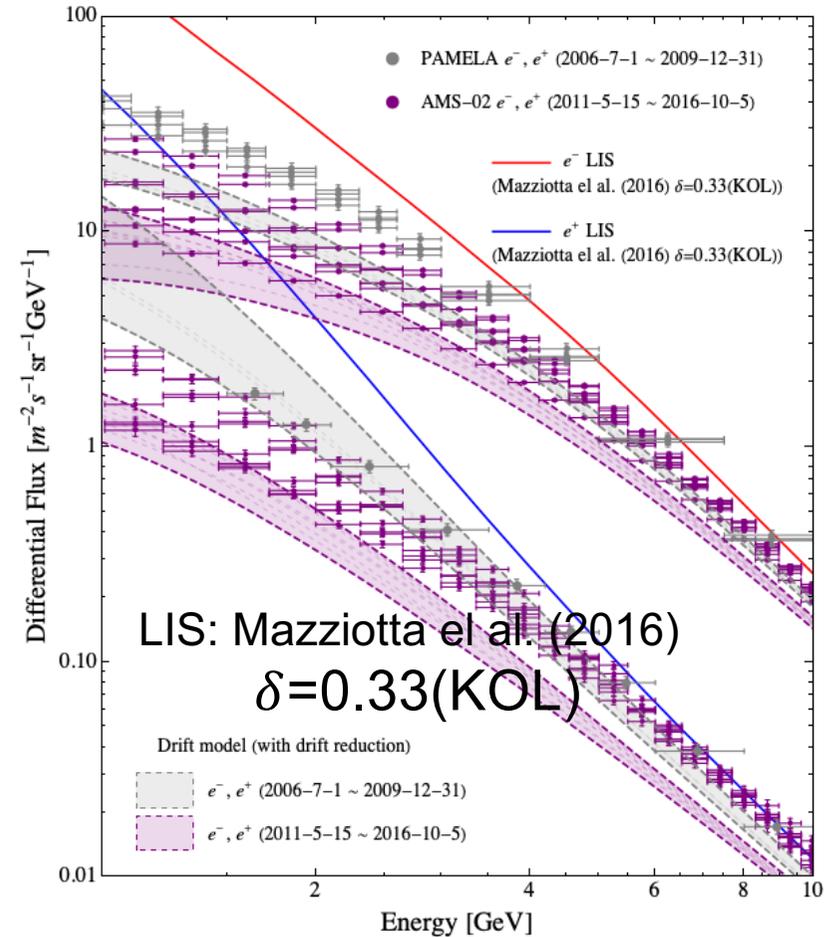


# 計算結果: 全電子エネルギースペクトル(PAMELA,AMS-02)

乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果を考慮しない場合 ( $f_{red} = 1$ )

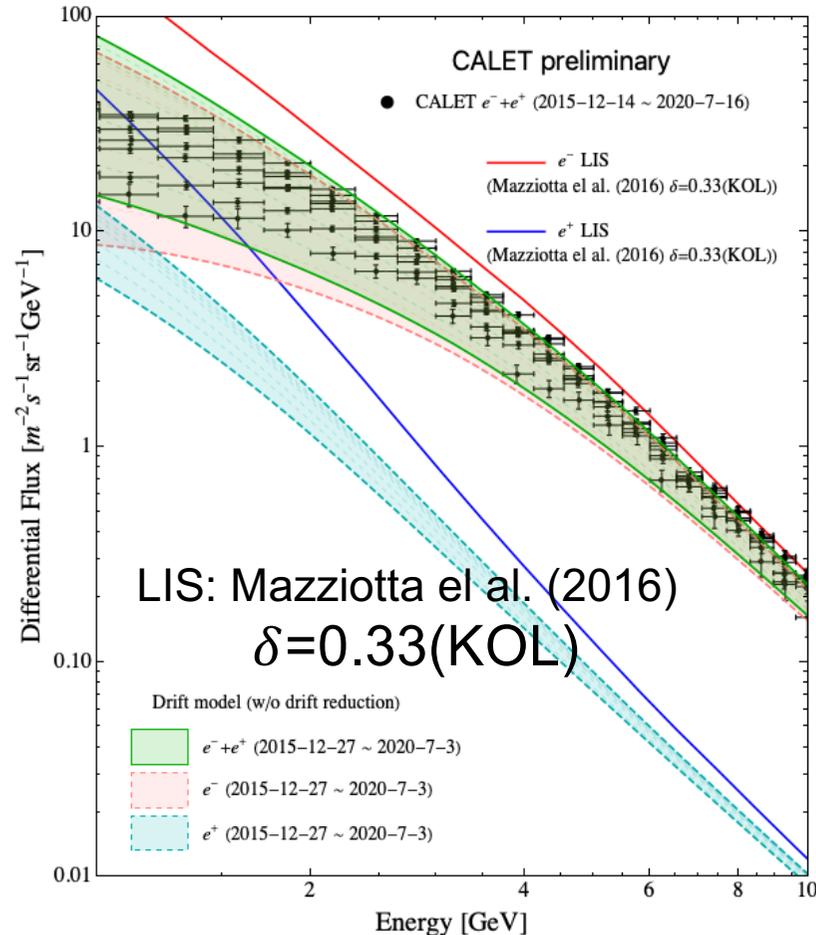


乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果を考慮した場合 ( $f_{red} \neq 1$ )

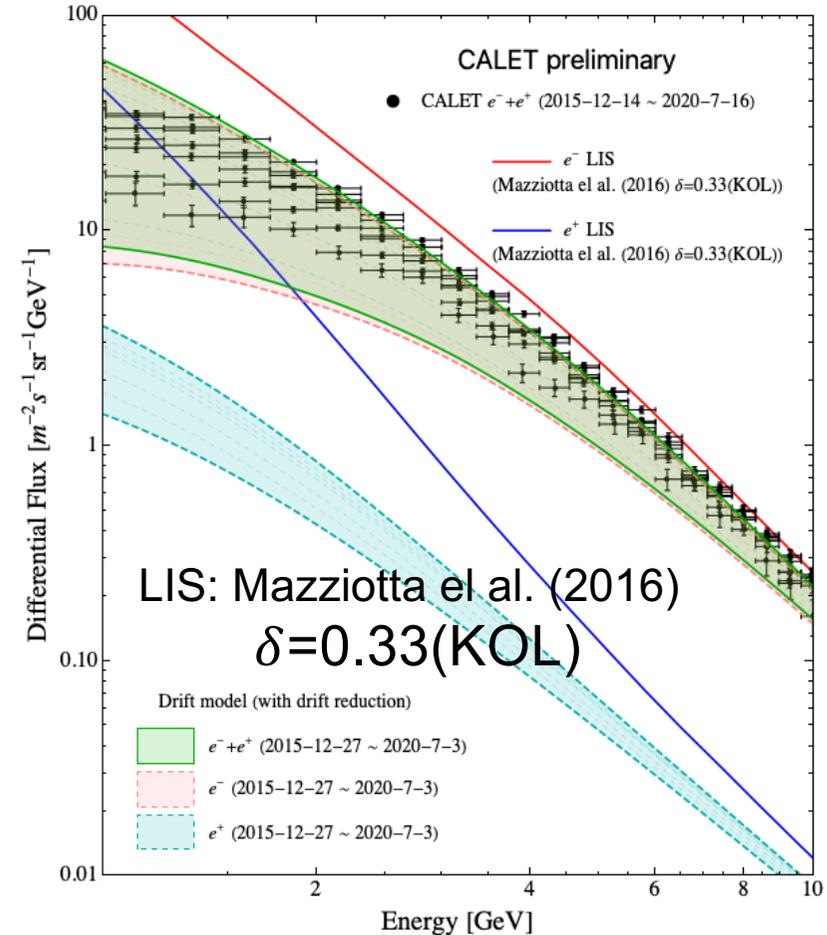


# 計算結果：全電子エネルギースペクトル

乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果を考慮しない場合 ( $f_{red} = 1$ )



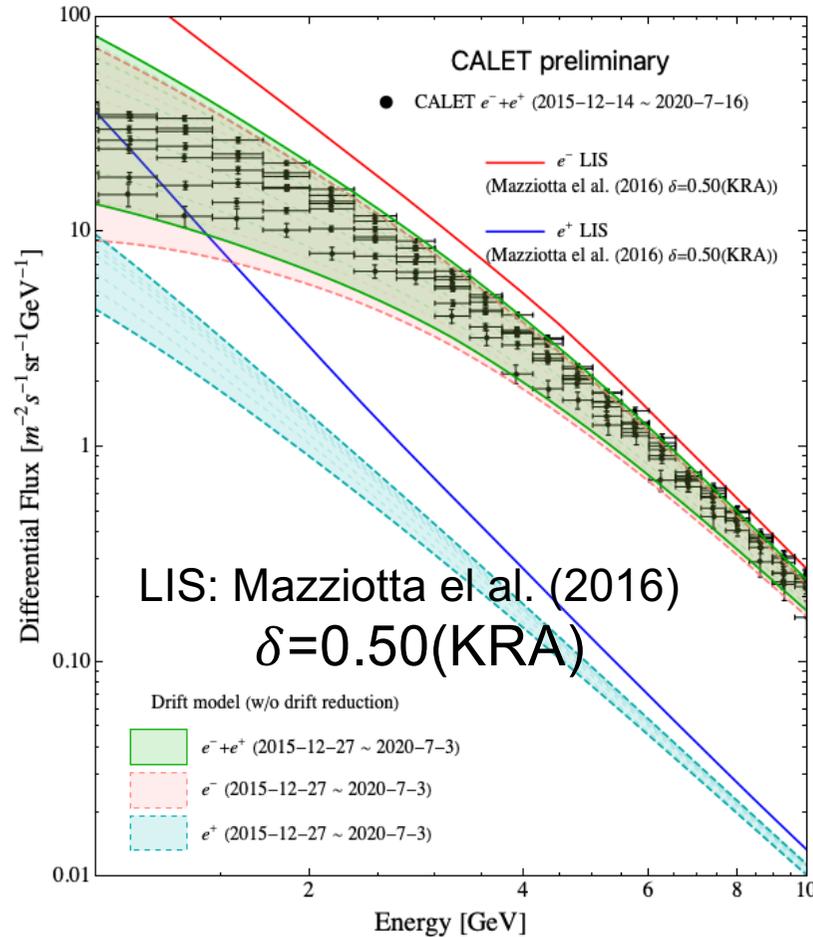
乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果を考慮した場合 ( $f_{red} \neq 1$ )



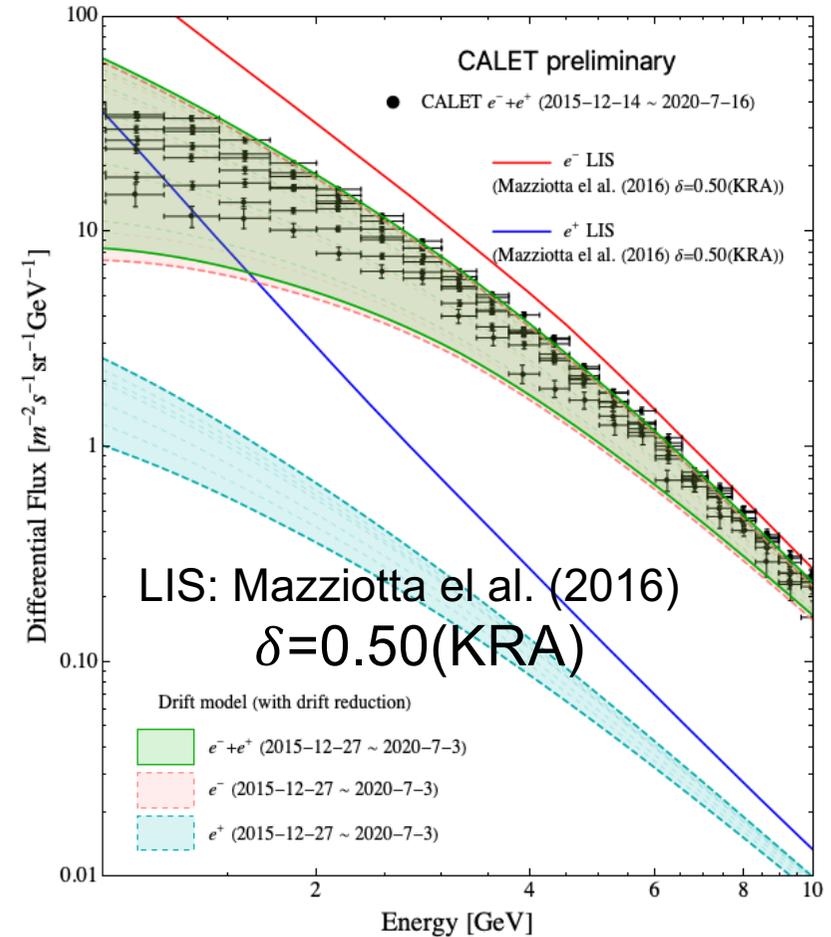
- 乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果で、陽電子 ( $qA>0$ の粒子) のフラックスは低下

# 計算結果：全電子エネルギースペクトル

乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果を考慮しない場合 ( $f_{red} = 1$ )



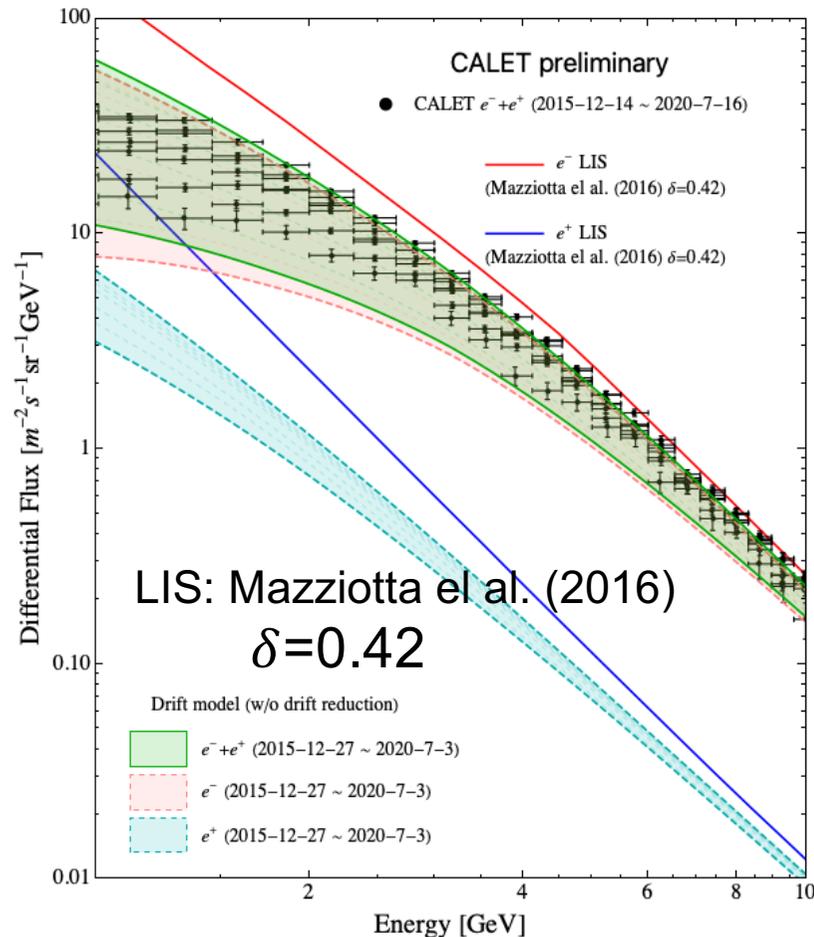
乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果を考慮した場合 ( $f_{red} \neq 1$ )



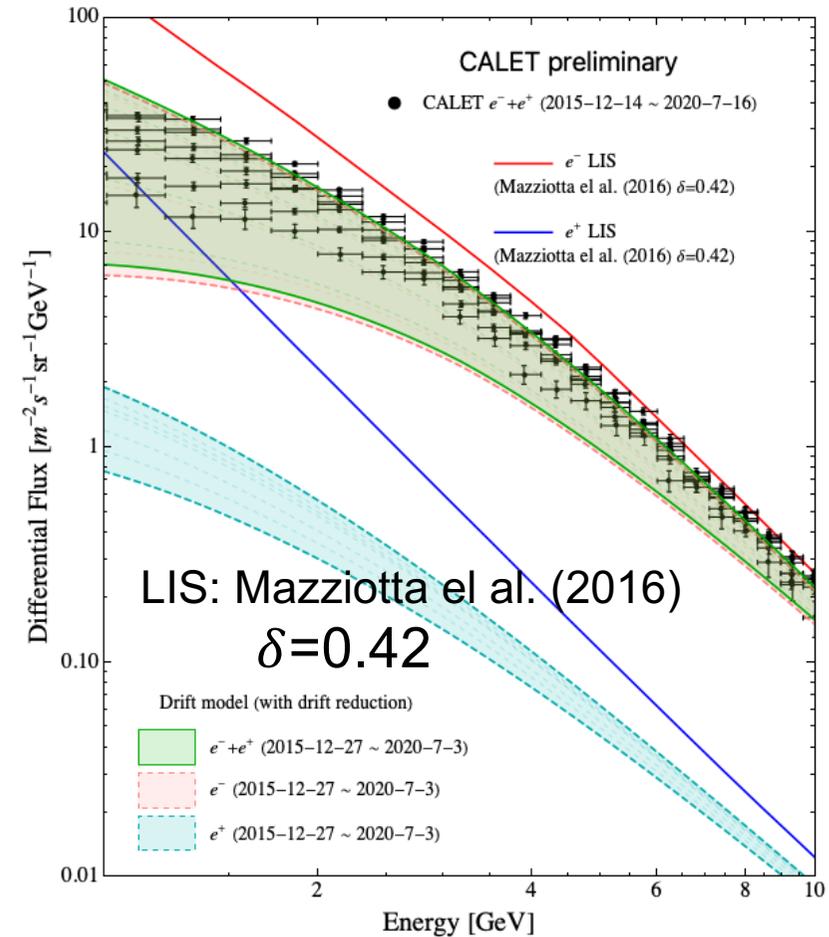
- 乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果で、陽電子 ( $qA>0$ の粒子) のフラックスは低下

# 計算結果：全電子エネルギースペクトル

乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果を考慮しない場合 ( $f_{red} = 1$ )



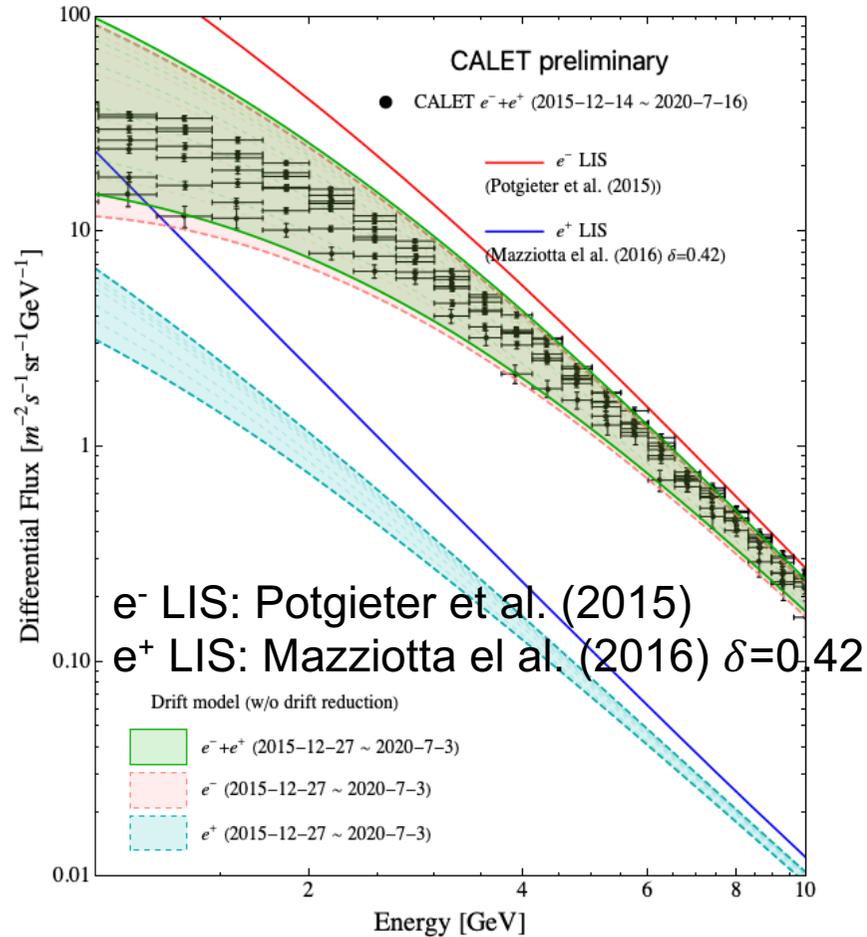
乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果を考慮した場合 ( $f_{red} \neq 1$ )



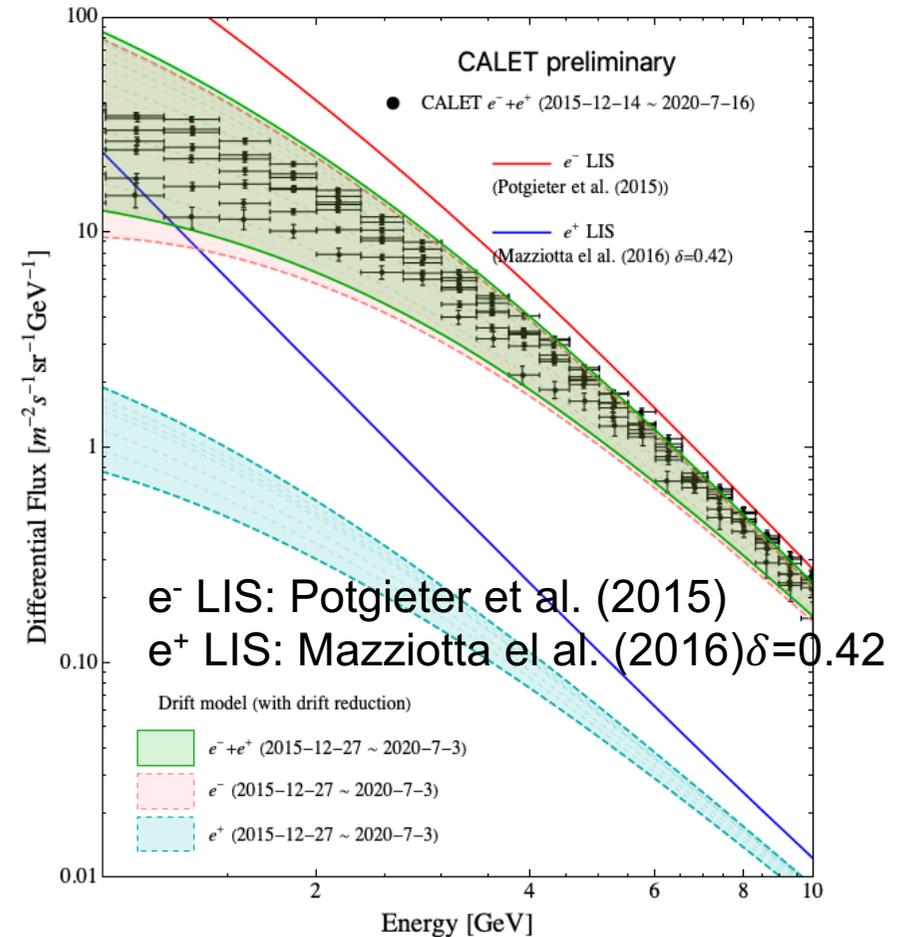
- 乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果で、陽電子 ( $qA>0$ の粒子) のフラックスは低下
- 標準的なLISを仮定した場合、計算した全電子エネルギースペクトルはCALETの観測結果よりも低くなる傾向がある

# 計算結果：全電子エネルギースペクトル

乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果を考慮しない場合 ( $f_{red} = 1$ )



乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果を考慮した場合 ( $f_{red} \neq 1$ )



- 乱流磁場によるドリフト運動の減衰効果で、陽電子 ( $qA>0$  の粒子) のフラックスは低下
- 標準的なLISを仮定した場合、計算した全電子エネルギースペクトルはCALETの観測結果よりも低くなる傾向がある

# Summary

- CALETの観測した太陽活動約半周期にわたる全電子フラックスおよび電子・陽子計数率を用いて、観測を再現する太陽変調モデルを構築した。
- 定性的な範囲に留まるが、本数値計算モデル(ドリフトモデル)でCALETの観測した低エネルギー電子・陽子の荷電依存性を再現した。
- ドリフト運動の減衰効果により、全電子・陽子ともにフラックスの変動幅は若干大きくなり、荷電依存性が弱まる。また陽電子( $qA > 0$ の粒子)のフラックスは低くなる。
- 銀河系内における宇宙線伝播から推定される標準的なLISを仮定した場合、計算した全電子エネルギースペクトルはCALETの観測結果よりも低くなる傾向がある。GeV領域のLISへの付加的な成分の存在、もしくは拡散係数の問題を示唆すると考えられる。