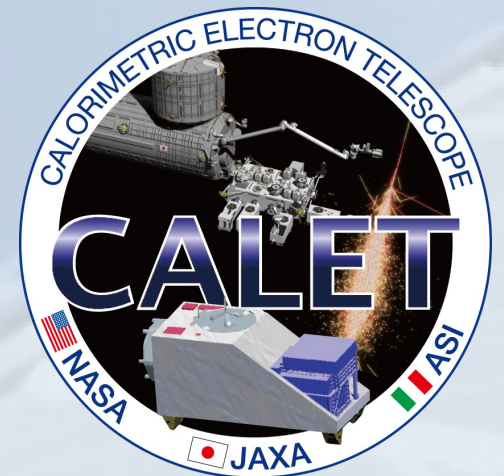


CALETの観測結果を用いた第24-25期太陽活動 遷移期間における太陽変調の理論的検証

茨城高専, 信大理^A, 極地研^B, 早大理工総研^C, JAXA^D, 東大宇宙線研^E
三宅晶子, 宗像一起^A, 片岡龍峰^B, 加藤千尋^A, 鳥居祥二^C,
中平 聡志^D, 寺澤敏夫^E, 赤池陽水^C, 小林兼好^C,
他CALETチーム



CALETによる電子・陽子の太陽変調の観測

LEE shower trigger

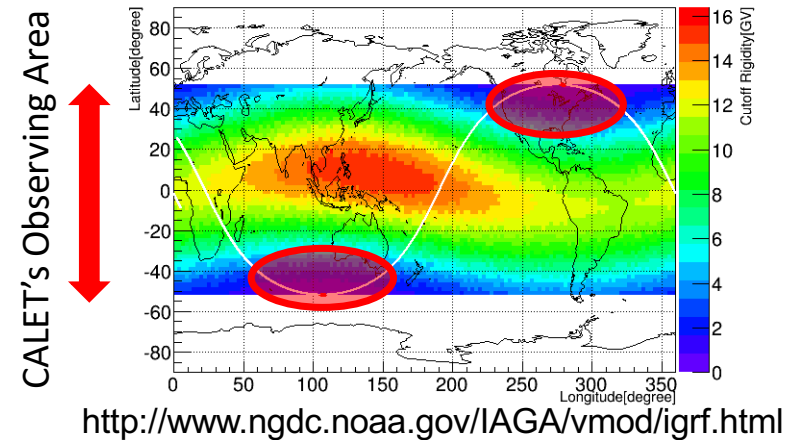
地磁気によるcutoff rigidityが約5.0GV以下の極領域 (ISSの周回軌道中、南北それぞれで90秒) において実施される、エネルギー閾値1.0GeVのトリガーモードで検出したイベントを解析

全電子・陽子のイベント選別条件

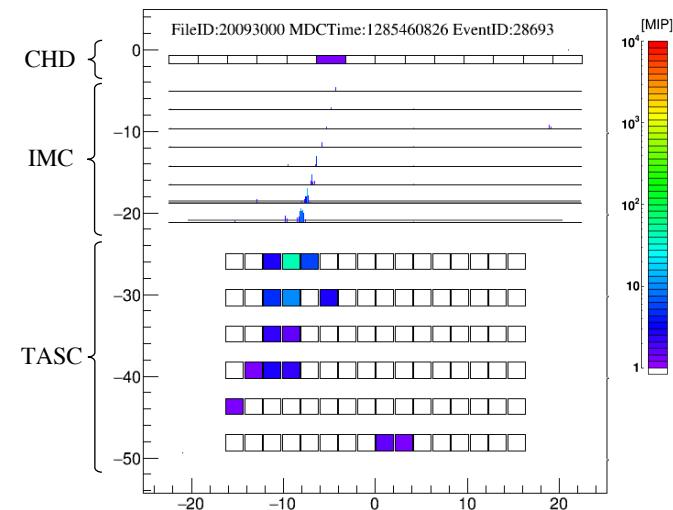
- Off-line trigger
- 飛跡再構成の精度
- 飛跡の幾何条件
- IMC, TASCでのenergy deposit
- CHDでのenergy deposit
- 全電子・陽子識別
 - IMC最下層でのenergy deposit
やシャワー集中度 (全電子選別のみ)
 - TASC最上層でのシャワーの横広がり
- Cutoff rigidityの制限 ($R_{\text{cut}} < 0.8\text{GV}$)

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

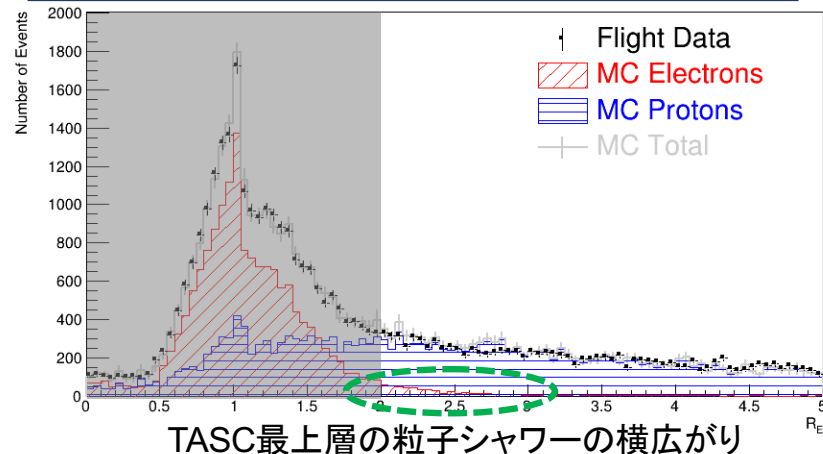


CALET Calorimeter with an LE event candidate with energy of $\sim 3.9\text{ GeV}$



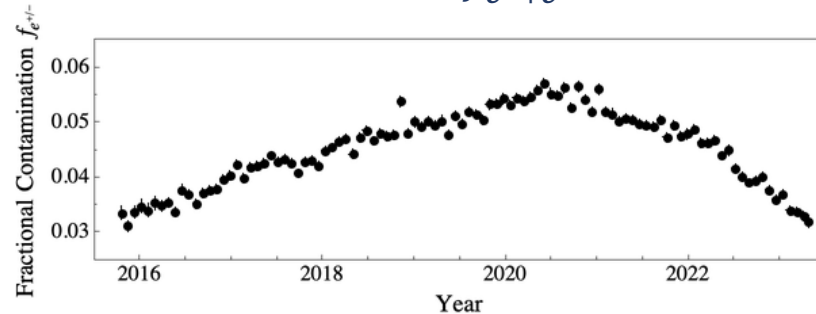
陽子・電子計数率の算出

Lateral shower development on the TASC top layer of proton candidates (sample)

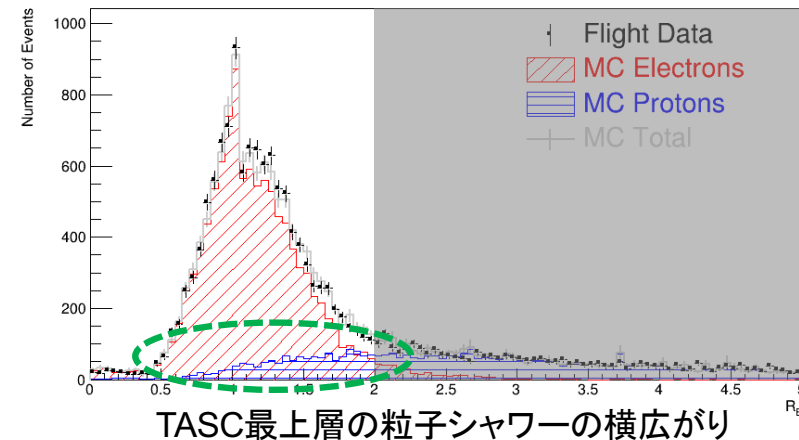


太陽活動に伴い、陽子・全電子混入率は時間変動する

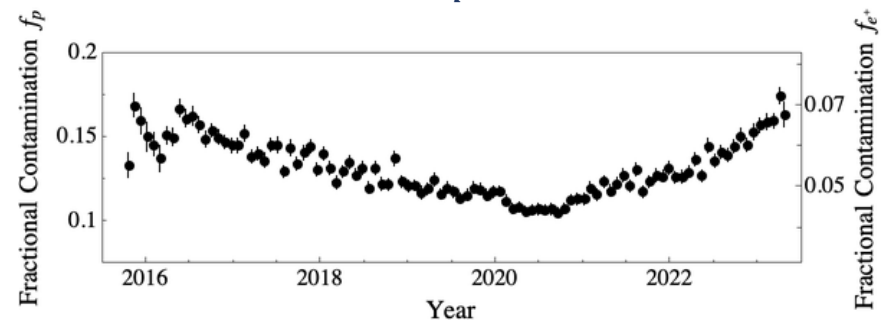
Fractional contaminations $f_{e^-+e^+}$ in p candidates



Lateral shower development on the TASC top layer of all electron candidates (sample)



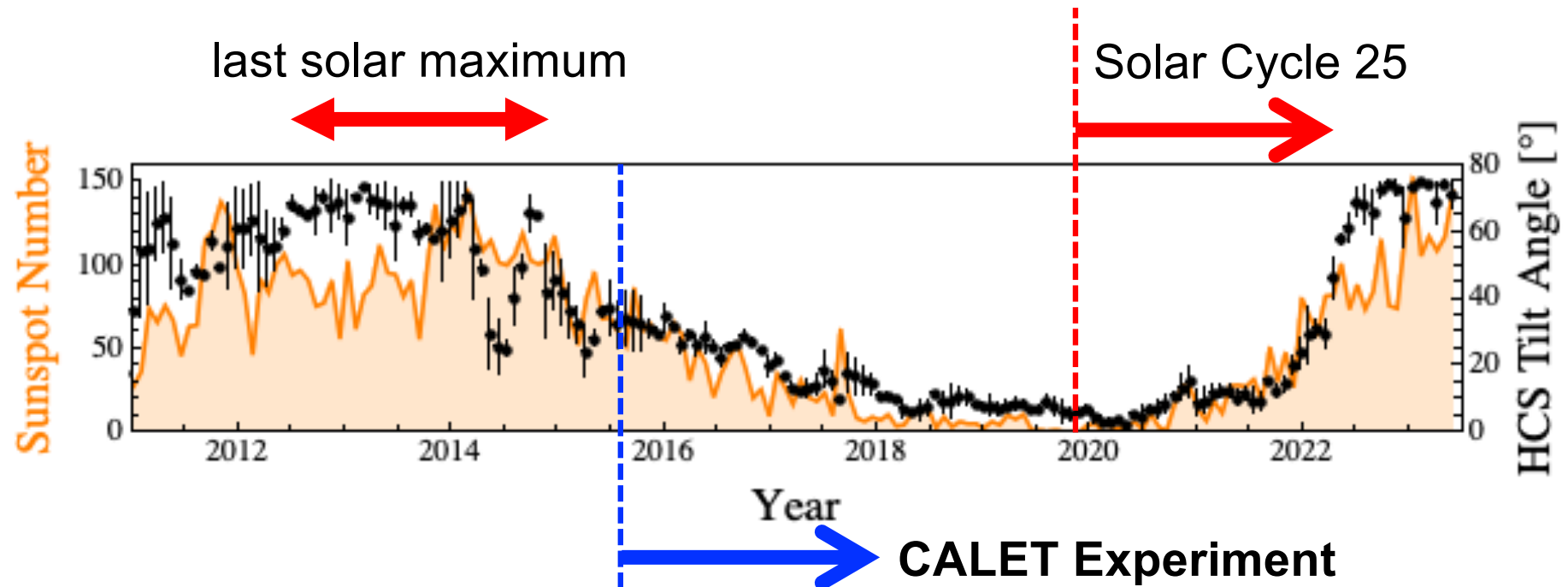
Fractional contaminations f_p and f_{e^+} in e^-+e^+ candidates



- 各Carrington Rotationにおける全電子候補イベント中の陽子混入率、陽子候補イベント中の全電子混入率から全電子、陽子の計数率を算出
- さらに全電子候補イベントに対する陽子混入率の変動をもとに陽電子成分の混入率を推定し、電子の計数率を算出。

近年の太陽活動

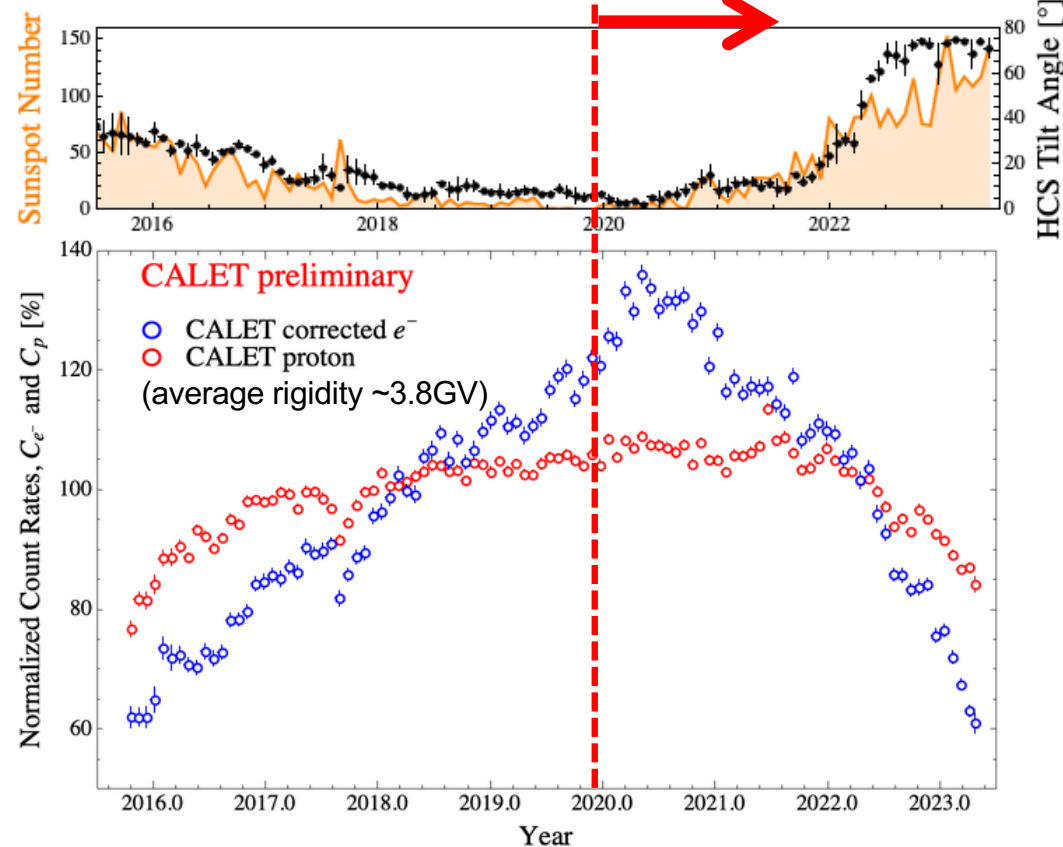
Time profile of the sunspot number and the HCS tilt angle



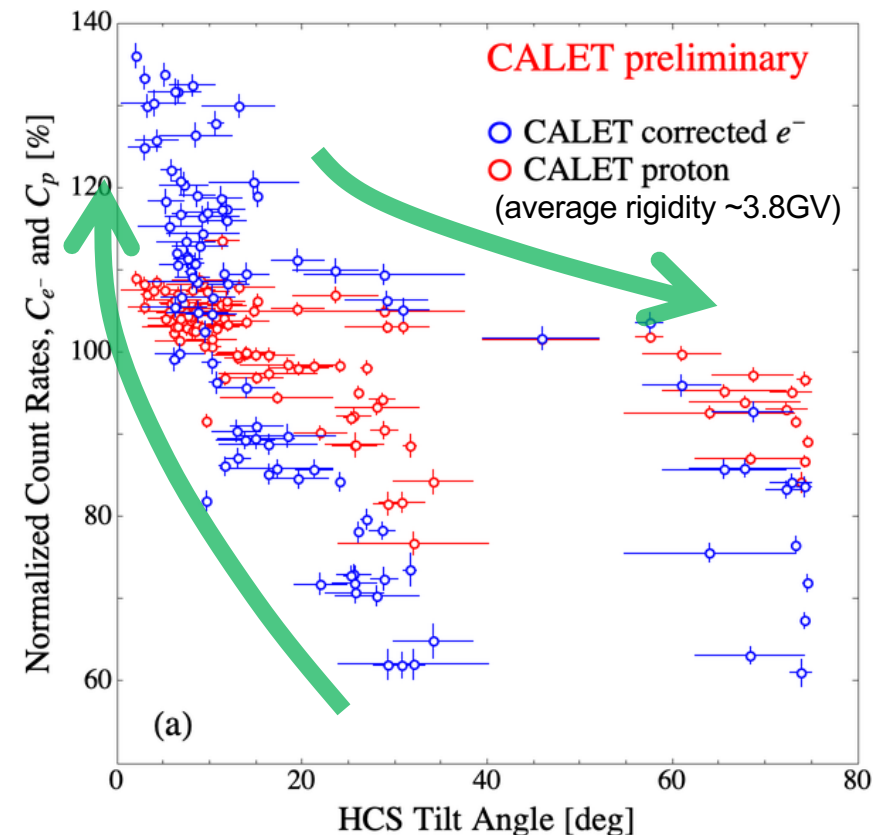
- 前回の太陽活動極大期は2014年周辺(このとき太陽磁場の極性が負から正極性に反転)
- 2019年12月に第25期太陽活動開始(太陽活動極小期)
- 2022年から急激に太陽活動が活性化
- カレントシートの傾き($\sim 75^\circ$)から、現在は太陽活動極大期に突入していると判断される

CALETによる陽子・電子計数率の最新観測結果

Time profile of the count rate of CR protons and corrected e^-



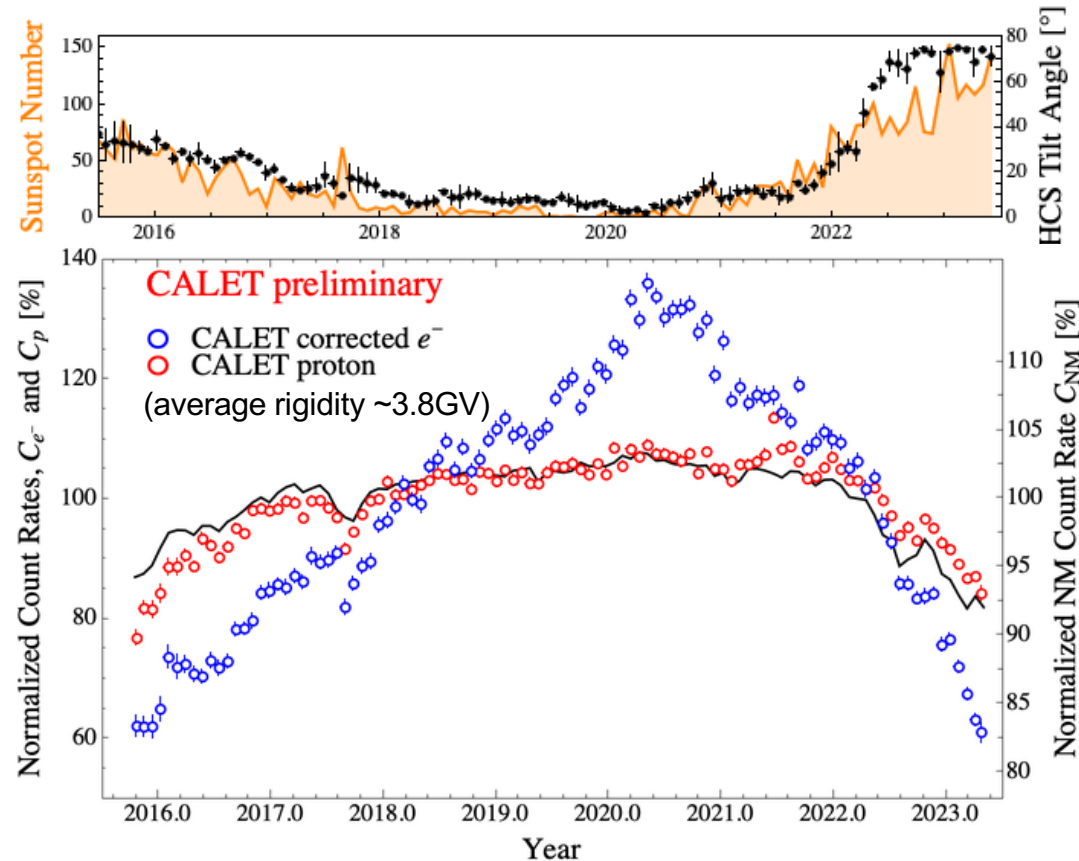
Correlation with count rate of CR protons/corrected e^- and HCS tilt angle



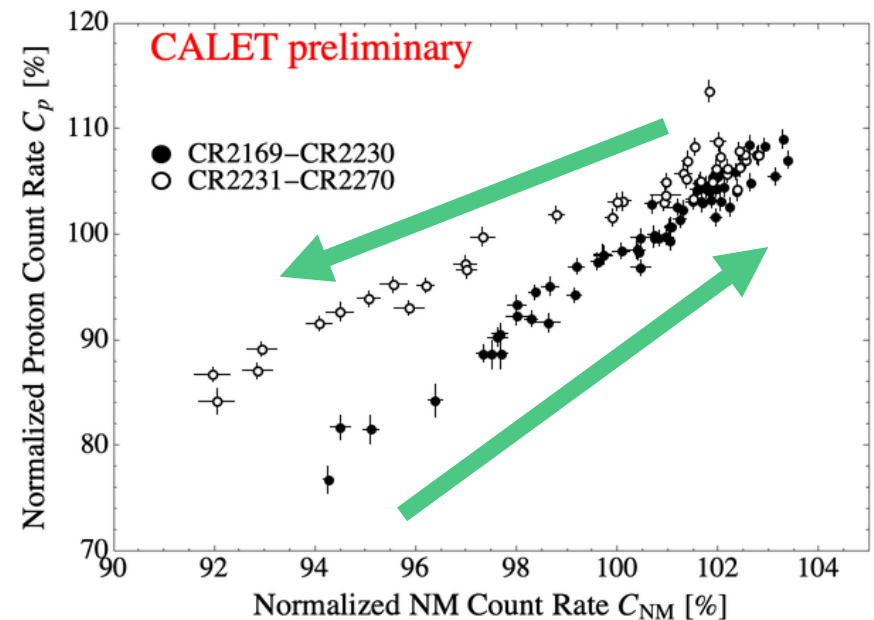
- CALETによる観測開始時期と同程度まで強度低下
- 太陽活動増進期も顕著な荷電依存性を検出
- カレントシートのティルト角に対する顕著なヒステリシス構造を検出

CALETによる陽子・電子計数率の最新観測結果

Time profile of the count rate of CR protons and corrected e^-



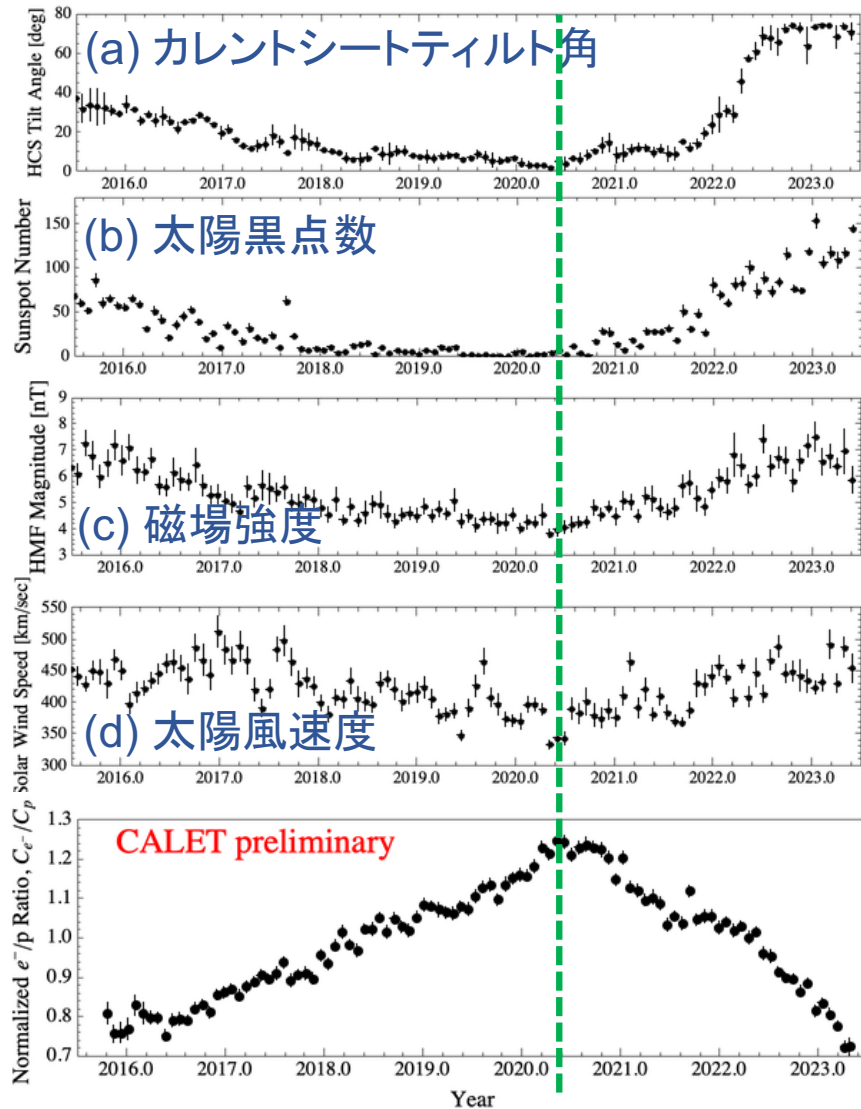
Correlation with count rate of CR protons and NM count rate



- CALETによる観測開始時期と同程度まで強度低下
- 太陽活動増進期も顕著な荷電依存性を検出
- カレントシートのティルト角に対する顕著なヒステリシス構造を検出
- 太陽活動減退期・増進期でrigidity依存性が変化することを確認

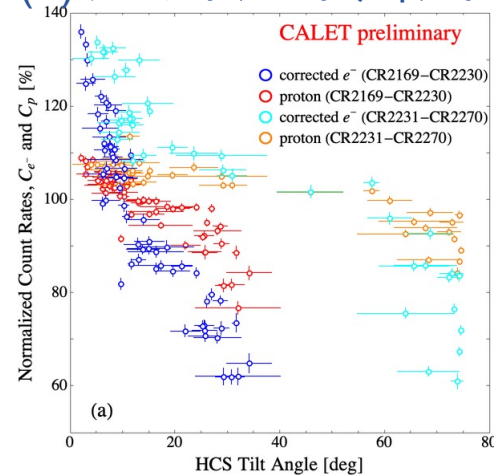
陽子・電子計数率と太陽圏の環境パラメータとの関係

Time profiles of Heliospheric parameters

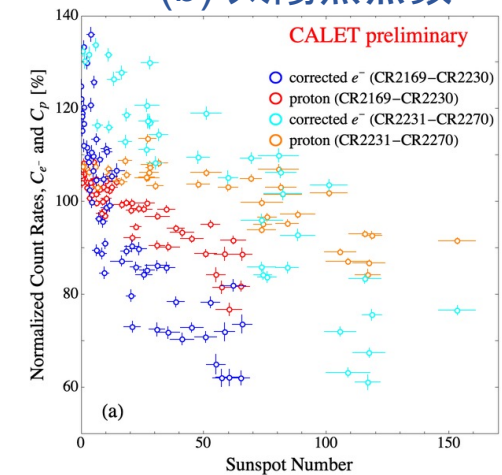


Correlation with count rate of CR protons/corrected e^- and Heliospheric parameters

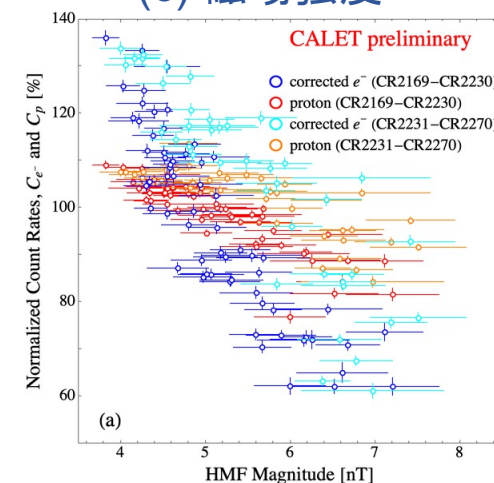
(a) カレントシートティルト角



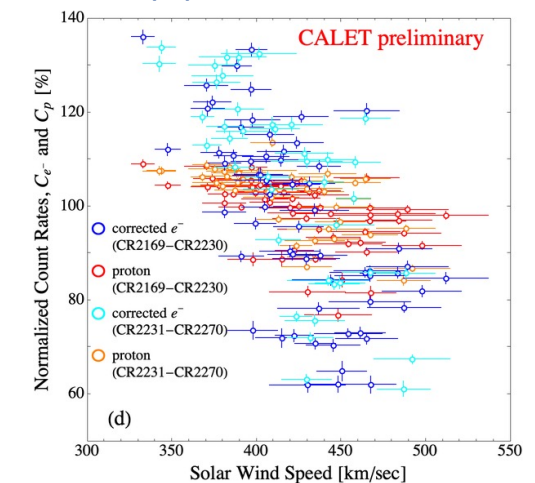
(b) 太陽黒点数



(c) 磁場強度



(d) 太陽風速度



- これらの充実した観測データは太陽変調モデルの精密化に役立つ。

太陽変調ドリフトモデルによる検証

- CALETの観測結果を用いて、太陽変調ドリフトモデルの検証を実施
- ドリフト運動の減衰効果の有無、拡散係数の異なる2種類のモデルを比較
(共通設定: LIS、観測に基づく太陽風速度, 惑星間空間磁場の変動)

ドリフト運動

Model A 減衰効果なし
(Miyake, ICRC 2017)

$$\langle v_D \rangle = \nabla \times \left(\kappa_A \frac{\vec{B}}{|B|} \right), \quad \kappa_A = \frac{v R_L}{3}$$

Model B 減衰効果あり
(Tautz and Shalchi, ApJ, 2012)

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

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

$$f_{\text{red}} = \frac{1}{1 + 1.09 \left(\frac{\delta B}{B_0} \right)^{1.62}}$$

拡散係数

Model A

$$\begin{cases} \kappa_{\parallel} = 1 \times 10^{22} \left(\frac{p}{1 \text{ GeV}/c} \right) \left(\frac{B_{1\text{AU}}}{B} \right) [\text{cm}^2/\text{s}] \\ \kappa_{\perp\theta} = 1 \times 10^{20} \left(\frac{p}{1 \text{ GeV}/c} \right) \left(\frac{B_{1\text{AU}}}{B} \right)^{1.4-0.7 \sin^2 \theta} [\text{cm}^2/\text{s}] \\ \kappa_{\perp 2} = 2 \times 10^{20} \left(\frac{p}{1 \text{ GeV}/c} \right) \left(\frac{B_{1\text{AU}}}{B} \right) [\text{cm}^2/\text{s}] \end{cases}$$

Model B 擬似非線形拡散 (A. Shalchi, Springer 2009)
(Miyake, COSPAR 2022)

$$\kappa_{\parallel} = \frac{1}{3} v \lambda_{\parallel}, \quad \kappa_{\perp} = \frac{1}{3} v \lambda_{\perp}$$

$$\lambda_{\parallel} = \frac{3 l_{\text{slab}}}{16 \pi C(\nu)} \left(\frac{B_0}{\delta B_{\text{slab}}} \right)^2 R^{2-2\nu} \left[\frac{2}{(1-\nu)(2-\nu)} + R^{2\nu} \right]$$

$$\lambda_{\perp} = \left(\sqrt{3} \pi C(\nu) l_{2D} \left(\frac{\delta B_{2D}}{B_0} \right)^2 \right)^{2/3} \lambda_{\parallel}^{1/3}$$

$$R = \frac{R_L}{l_{\text{slab}}}, \quad C(\nu) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma(\nu)}{\Gamma(\nu - \frac{1}{2})}$$

$$\left(\begin{array}{l} R_L: \text{ラーモア半径} \\ B_0: \text{平均磁場} \end{array} \right)$$

太陽変動ドリフトモデルによる検証

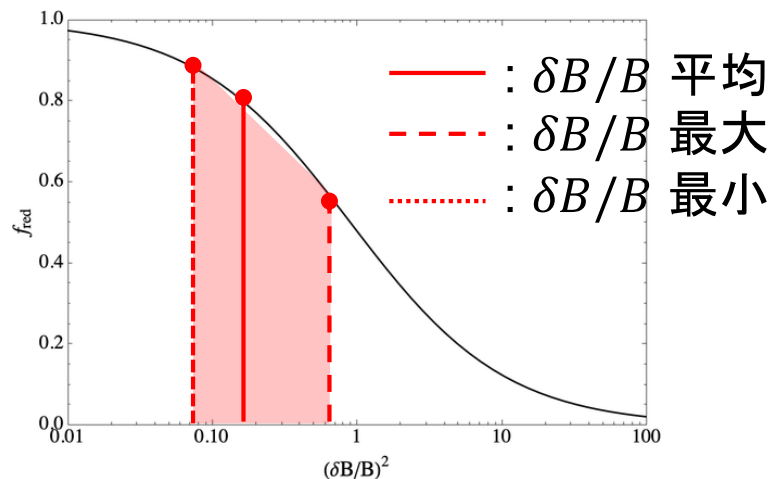
- CALETの観測結果を用いて、太陽変動ドリフトモデルの検証を実施
- ドリフト運動の減衰効果の有無、拡散係数の異なる2種類のモデルを比較
(共通設定:LIS、観測に基づく太陽風速度,惑星間空間磁場の変動)

ドリフト運動

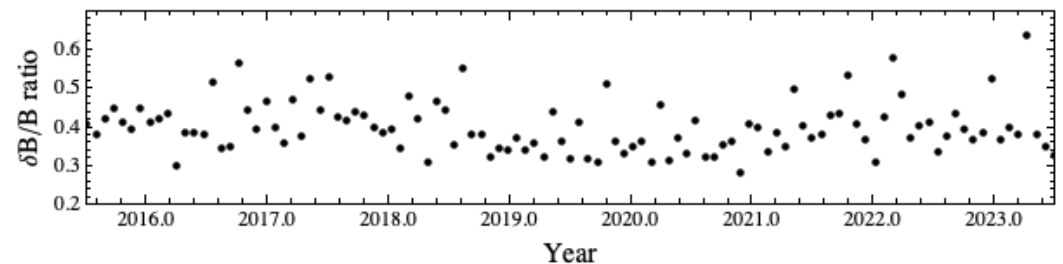
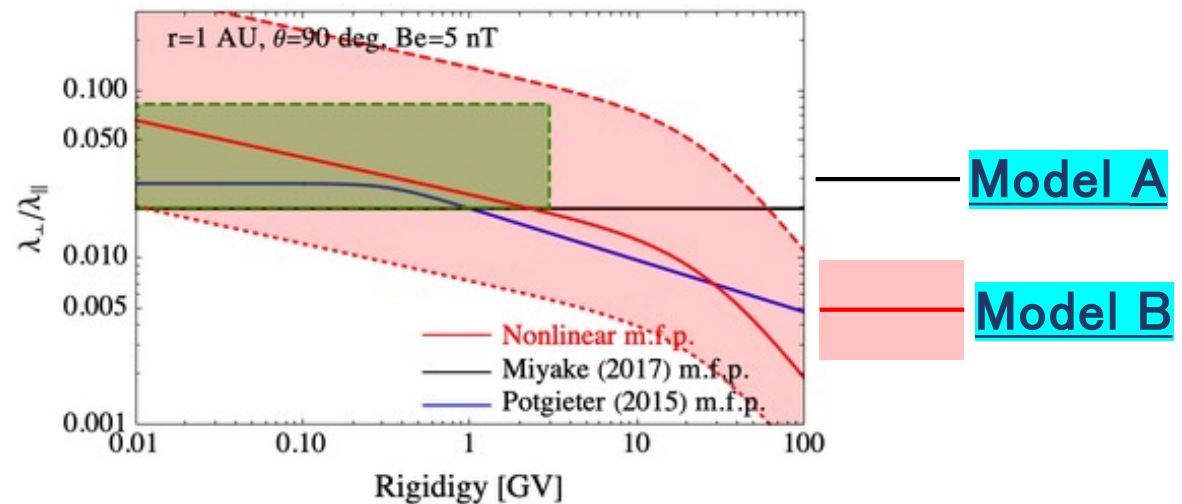
$$\langle v_D \rangle = \nabla \times \left(\kappa_A \frac{\vec{B}}{|B|} \right), \quad \kappa_A = \frac{v_{RL}}{3} f_{\text{red}}$$

Model A $f_{\text{red}} = 1$

Model B $f_{\text{red}} = \frac{1}{1 + 1.09 \left(\frac{\delta B}{B_0} \right)^{1.62}}$

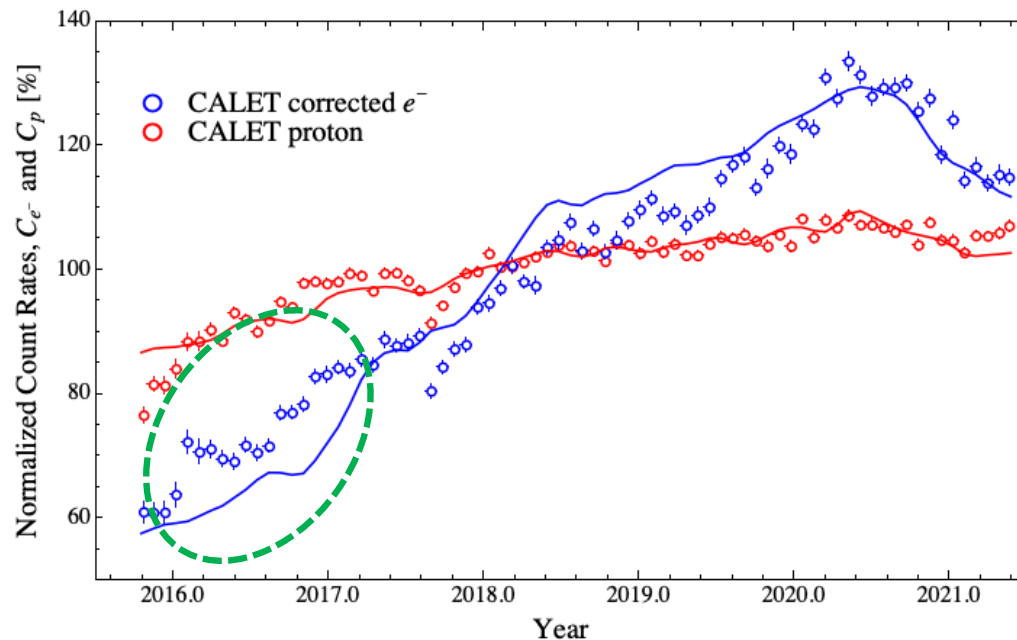


拡散係数

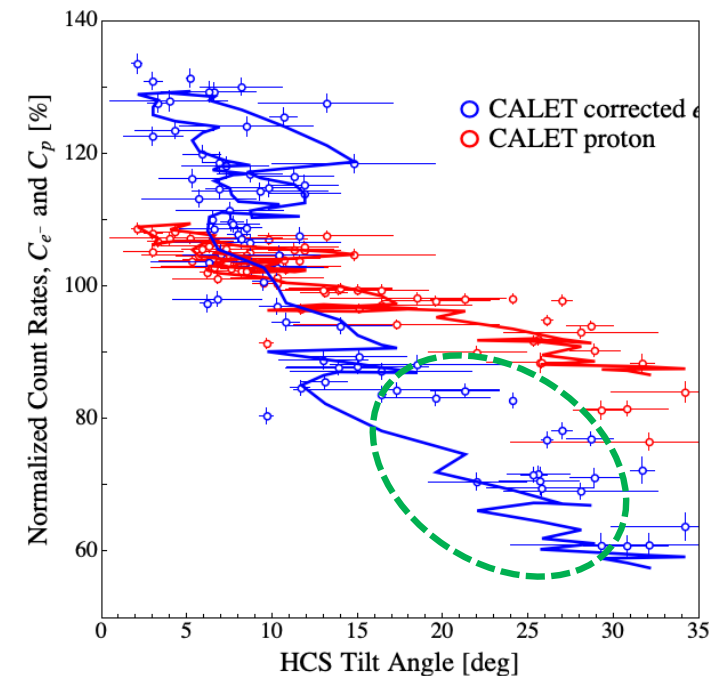


太陽変動ドリフトモデルによる検証: **Model A**

Time profile of the count rate of CR protons and corrected e^-



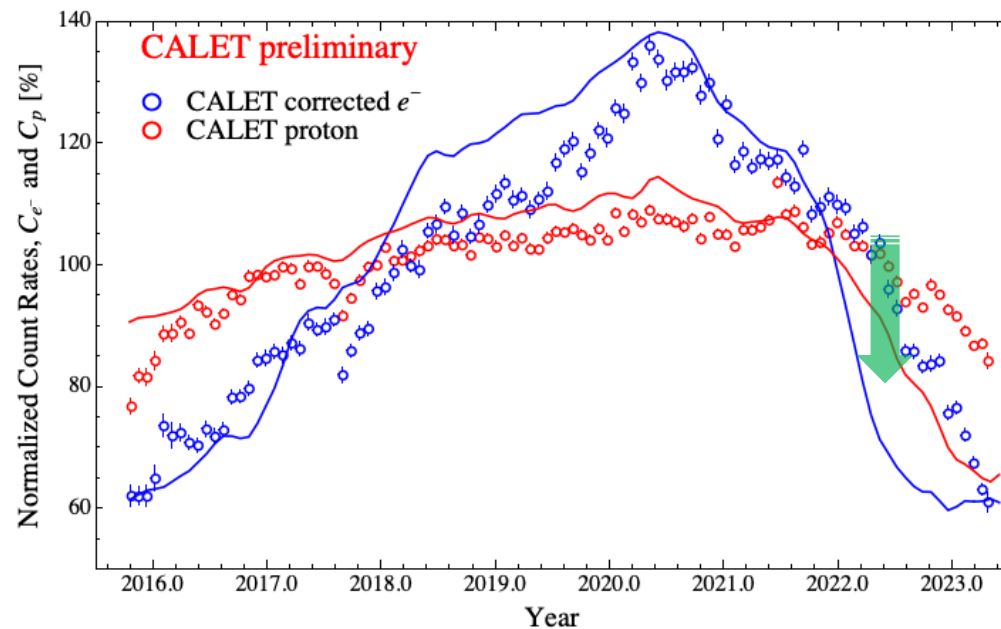
Correlation with count rate of CR protons/corrected e^- and HCS tilt angle



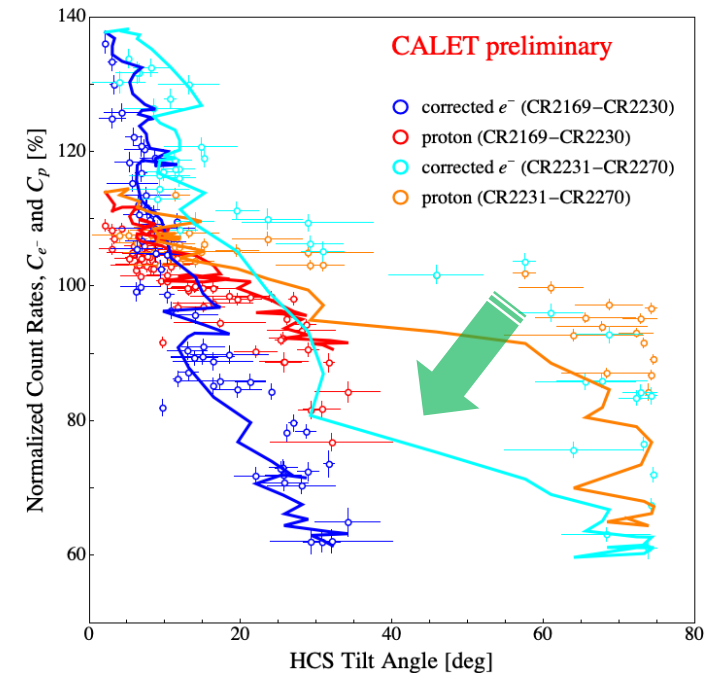
- 太陽活動減退期までの比較において、Model AはCALETの観測で得られた荷電依存性やヒステリシス構造ををとおむね再現することに成功(2016年周辺の不一致は課題)([O. Adriani et al. \(CALET Collaboration\), PRL, 130, 2023](#))

太陽変動ドリフトモデルによる検証: Model A

Time profile of the count rate of CR protons and corrected e^-



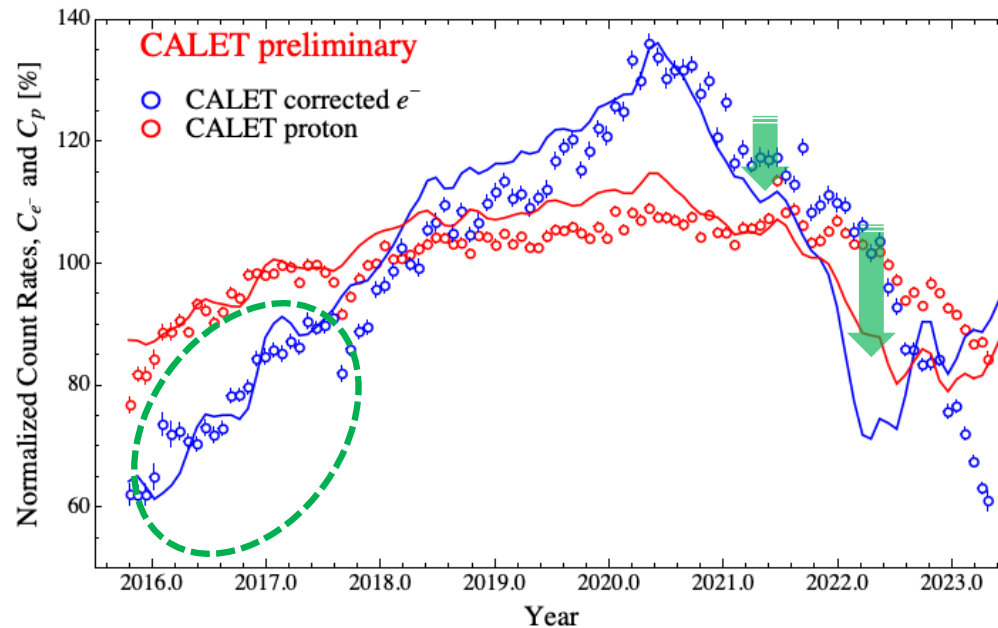
Correlation with count rate of CR protons/corrected e^- and HCS tilt angle



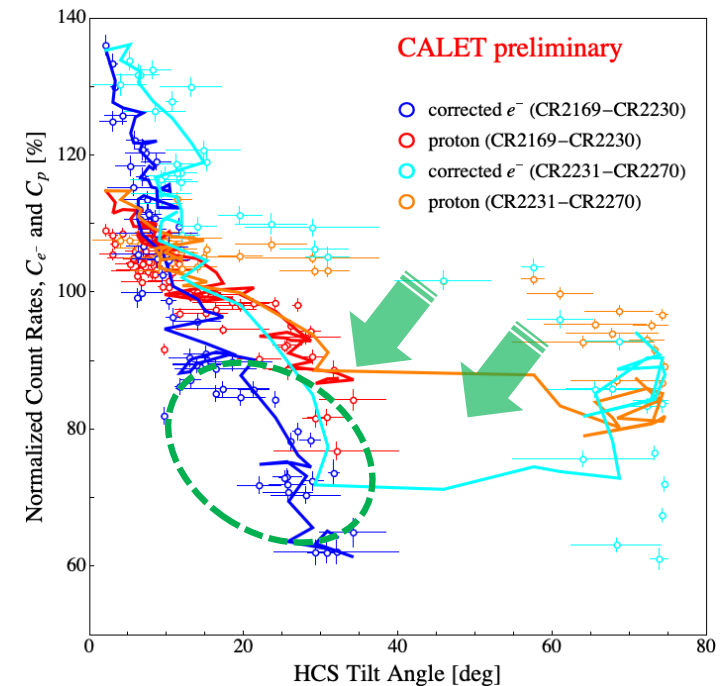
- 太陽活動減退期までの比較において、Model AはCALETの観測で得られた荷電依存性やヒステリシス構造ををとおむね再現することに成功(2016年周辺の不一致は課題)([O. Adriani et al. \(CALET Collaboration\), PRL, 130, 2023](#))
- しかしながら、太陽活動増進期は観測よりも早いペースで強度低下(太陽活動減退期と増進期の強度変動の差が小さく、ヒステリシス構造が小さい)

太陽変動ドリフトモデルによる検証: Model B

Time profile of the count rate of CR protons and corrected e^-



Correlation with count rate of CR protons/corrected e^- and HCS tilt angle



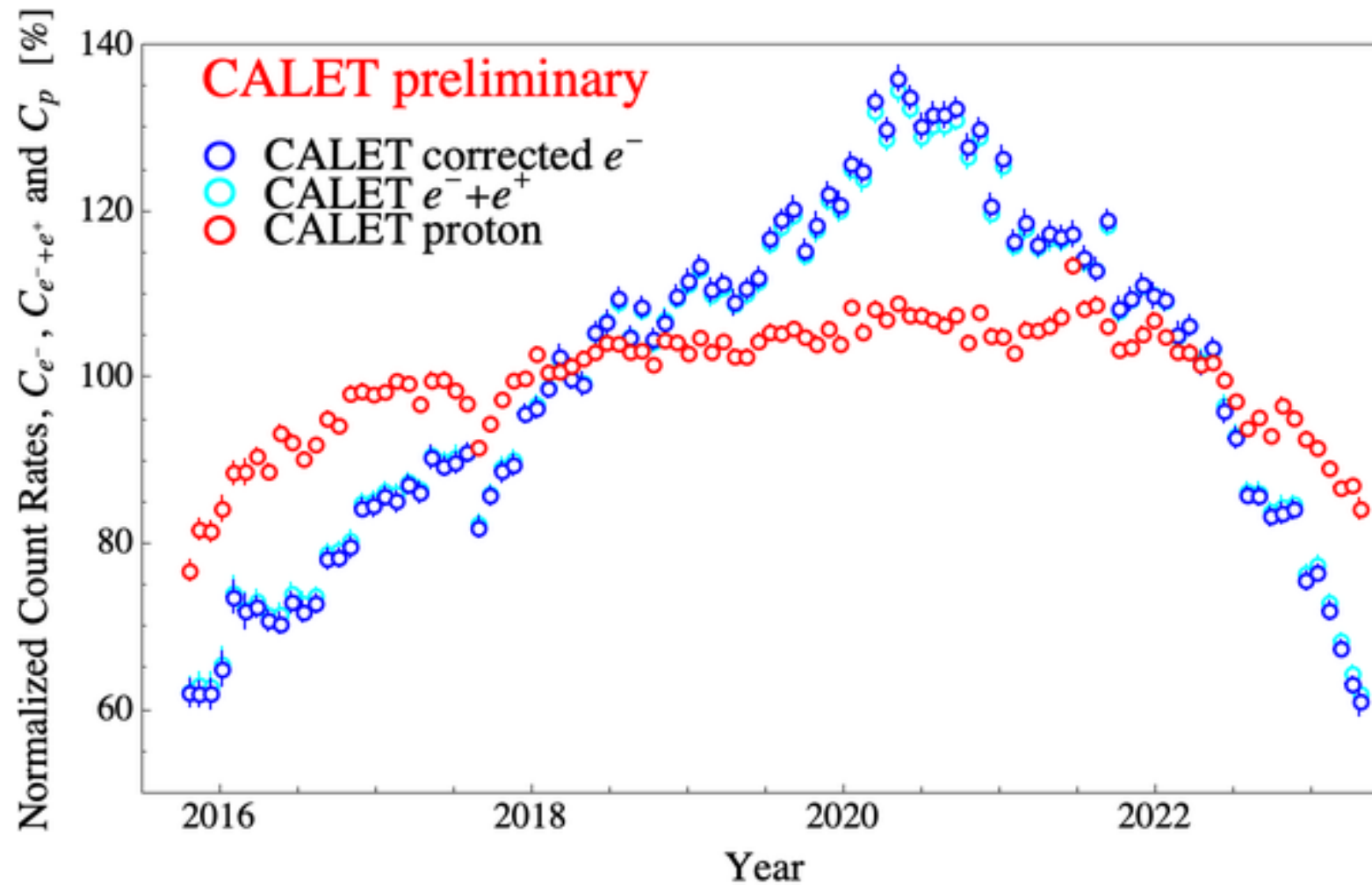
- Model Aに見られた2016年周辺の不一致があまりない
- Model A以上に、太陽活動増進期は観測よりも早いペースで強度低下(太陽活動減退期と増進期の強度変動の差がかなり小さく、有意なヒステリシス構造がない)

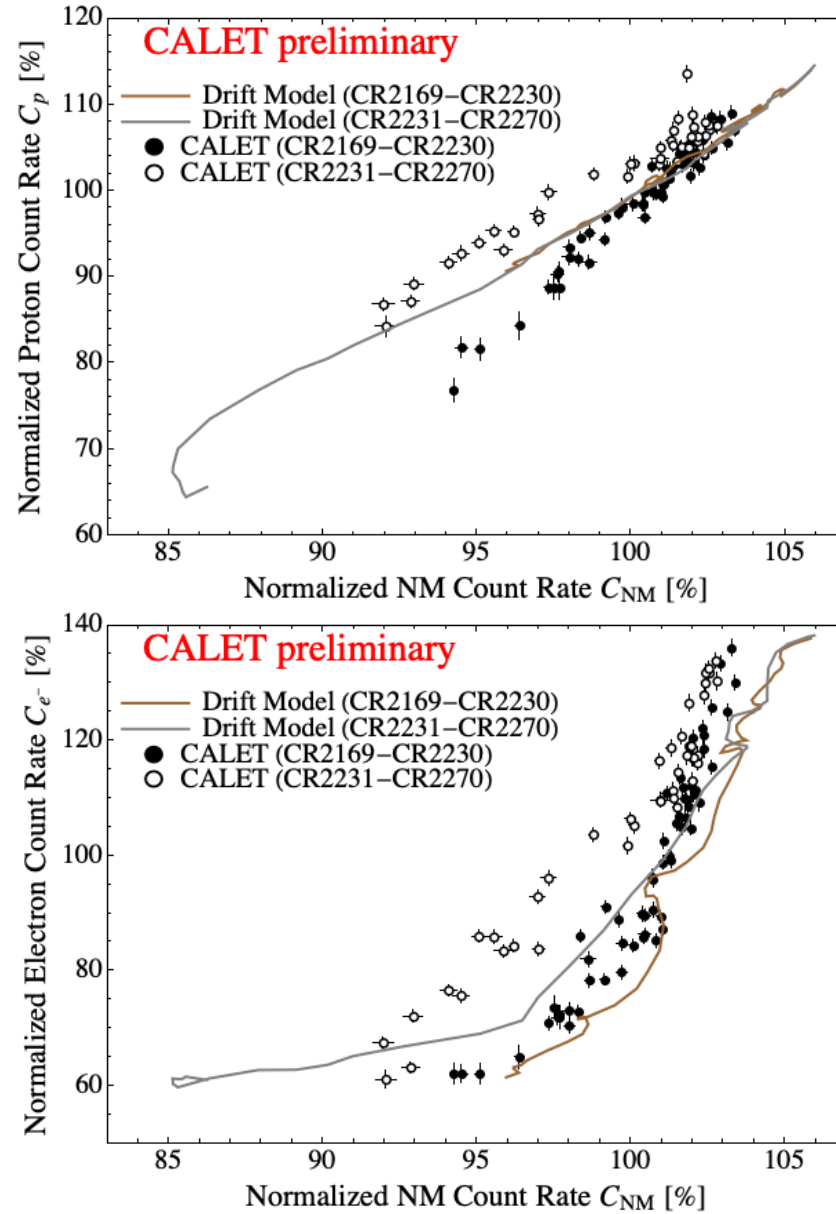
Summary

- 2022年から急激に太陽活動が活性化。カレントシートの傾き($\sim 75^\circ$)から、現在は太陽活動極大期に突入していると判断される。
- 2015年10月～2023年4月における平均rigidity 3.8GVの陽子・電子計数率を解析
 - 陽子・電子計数率は2015年10月の観測開始時期と同程度まで強度低下
 - ドリフトモデルから示唆される荷電依存性やカレントシートティルト角に対するヒステリシス構造は太陽活動増進期においても継続
 - 太陽活動減退期・増進期でrigidity依存性が変化することを確認
- CALETの観測結果を用いて、2種類の太陽変調ドリフトモデルを検証
 - 太陽活動減退期の変動は比較的よく再現できるが、太陽活動増進期は観測よりも早いペースで強度低下し、ヒステリシス構造の再現性が低い
- 引き続き、太陽活動減退期・増進期をカバーするCALETの低エネルギー電子・陽子の精密観測結果を用いて、太陽変調ドリフトモデルのさらなる改善を進める。

Buckup

CALETによる陽子・電子・全電子計数率



Model A**Model B**