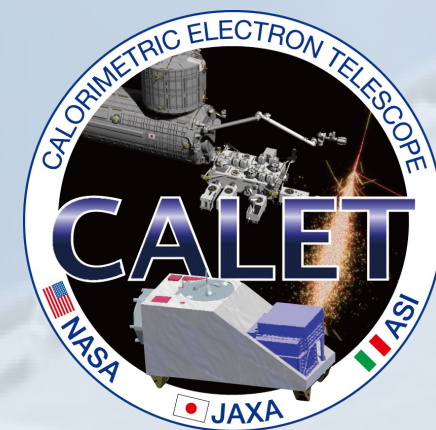


太陽活動約一周期にわたる 太陽変調観測の成果

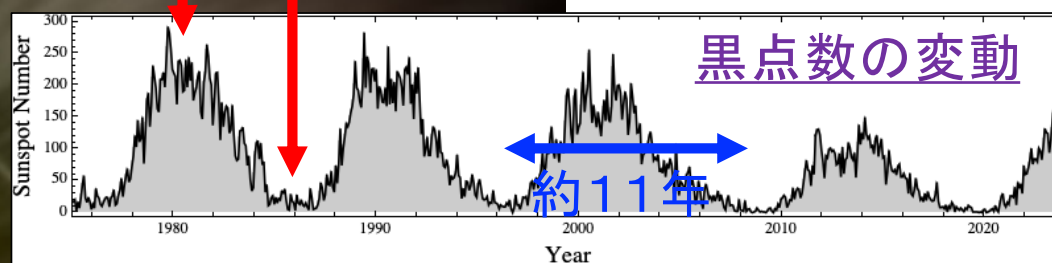
三宅 晶子(岐阜高専) 他 CALETチーム



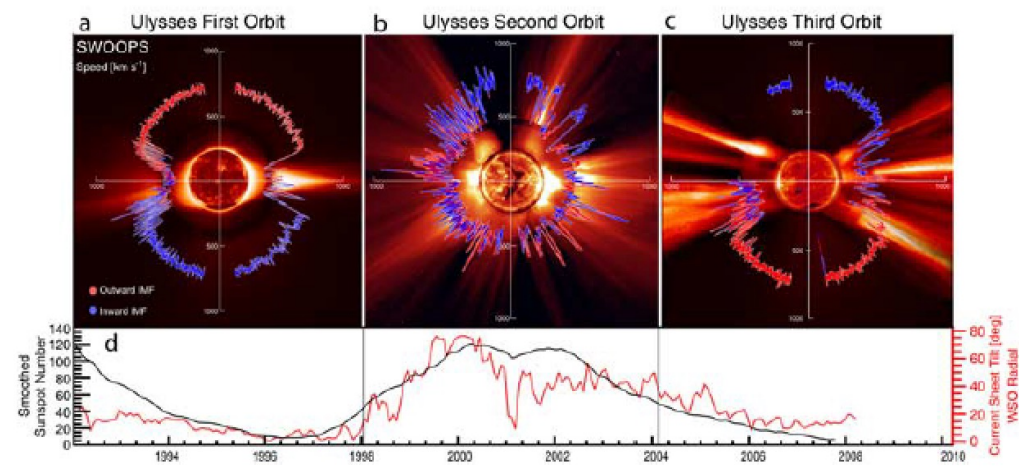
太陽変調：太陽活動に伴う低エネルギー宇宙線の強度変動

太陽圏(太陽風に支配された領域)

太陽活動極大期：黒点数が極大
太陽活動極小期：黒点数が極小



太陽風速度分布の変動 (McComas, GRL, 2008)



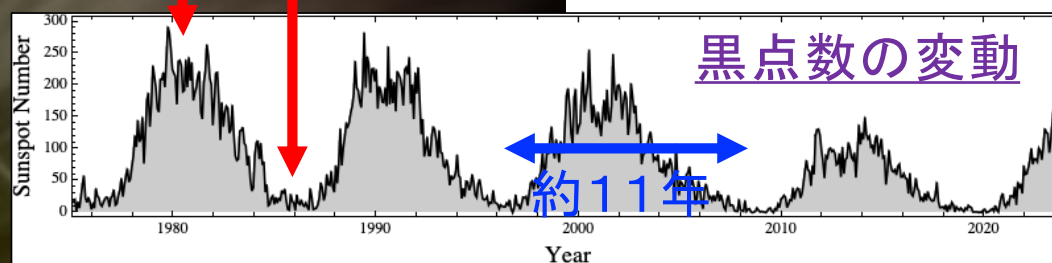
太陽変調：太陽活動に伴う低エネルギー宇宙線の強度変動

太陽圏(太陽風に支配された領域)

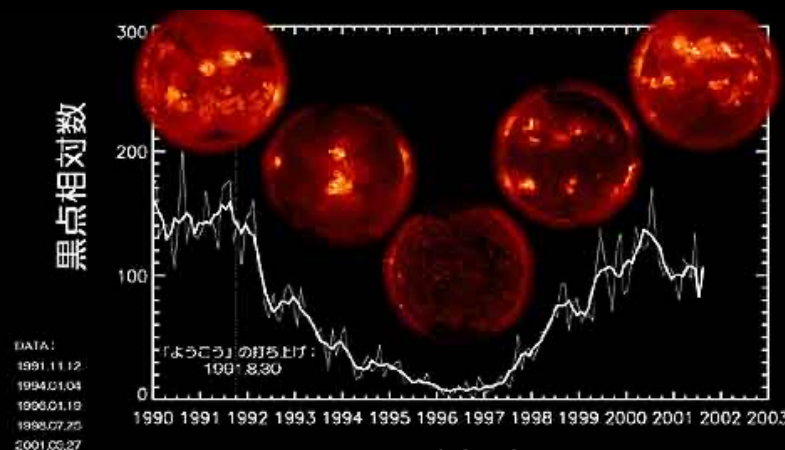
銀河宇宙線

強度変動

太陽活動極大期：黒点数が極大
太陽活動極小期：黒点数が極小



太陽フレア(硬X線)の変動



(ISASニュース No.262)

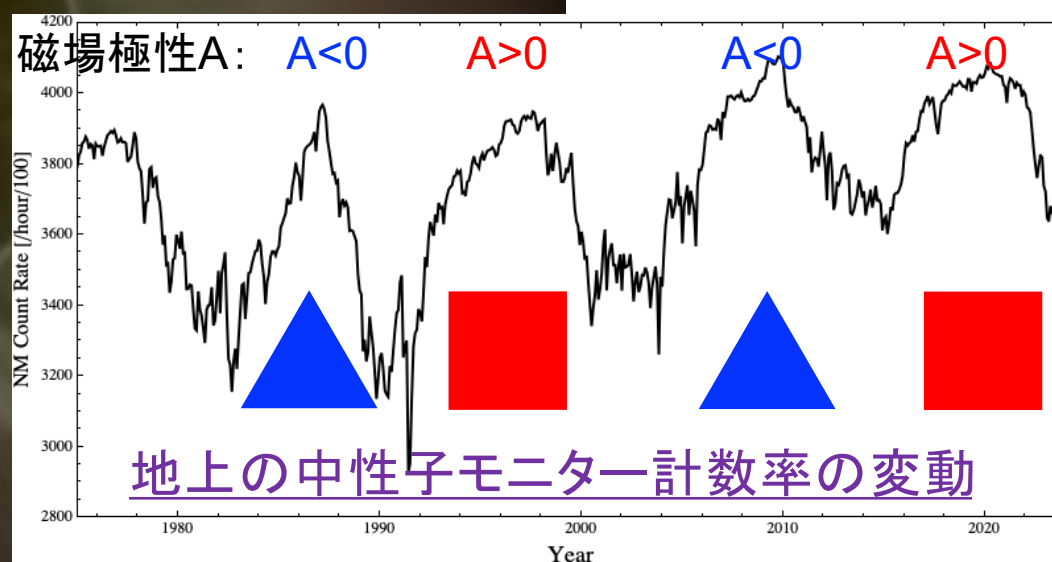
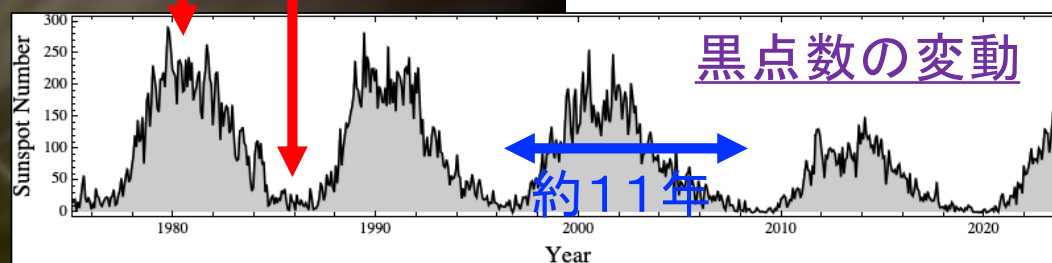
太陽変調：太陽活動に伴う低エネルギー宇宙線の強度変動

太陽圏(太陽風に支配された領域)

銀河宇宙線

強度変動

太陽活動極大期：黒点数が極大
太陽活動極小期：黒点数が極小



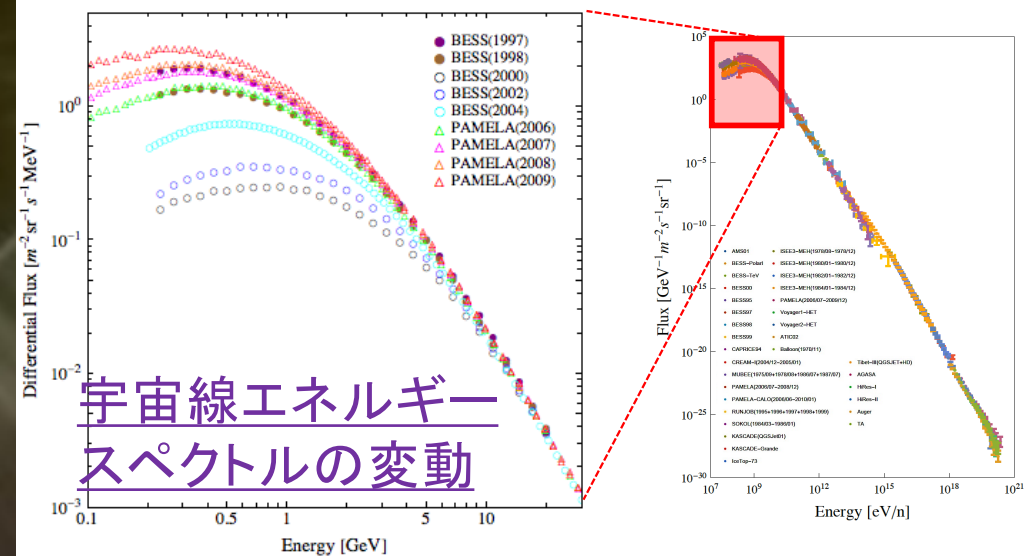
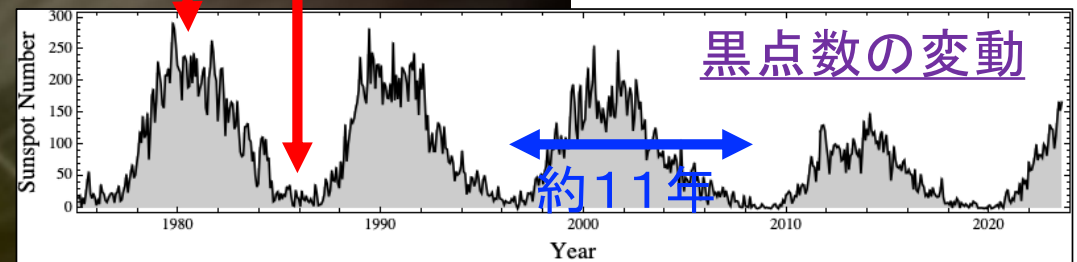
太陽変調：太陽活動に伴う低エネルギー宇宙線の強度変動

太陽圏(太陽風に支配された領域)

銀河宇宙線

強度変動

太陽活動極大期：黒点数が極大
太陽活動極小期：黒点数が極小



太陽変動観測の目的

太陽圏内における宇宙線伝播の理解

- 拡散係数
- ドリフト運動 etc.

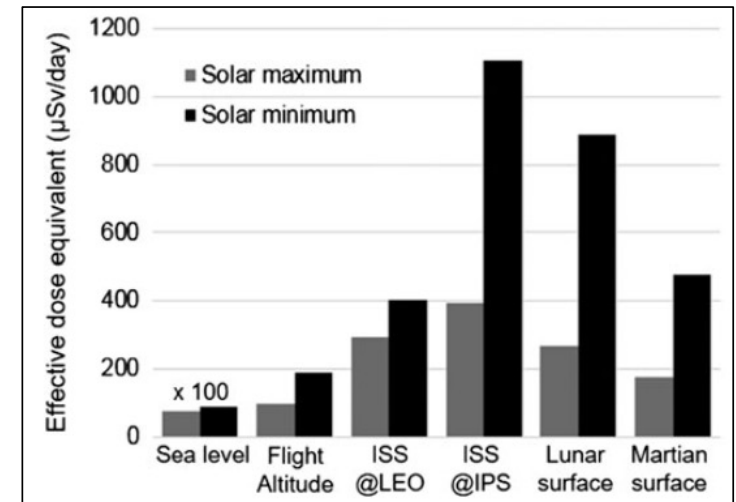
低エネルギー宇宙線に隠れる物理の解明

- ダークマター
- 原始ブラックホールの蒸発
- 太陽圏近傍の白色矮星での宇宙線加速 etc.

宇宙天気予報への寄与

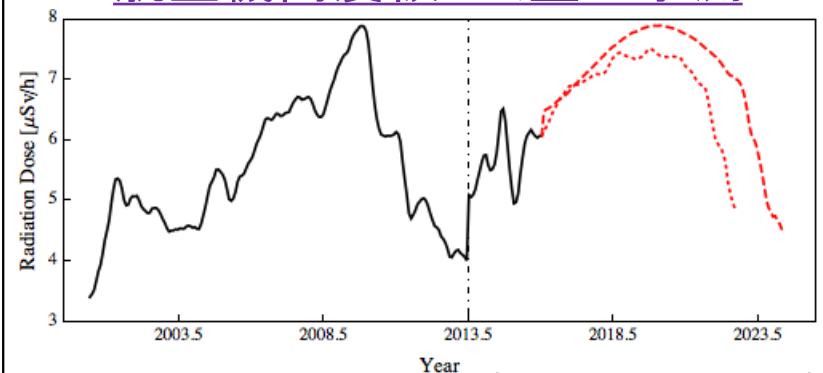
- 宇宙機などに搭載された精密機器の半導体の誤作動・破壊(シングルイベント効果)
- 宇宙飛行士・航空機高度乗務員の被ばく

宇宙空間における被ばく量の変動



(Sato et al., 2018)

航空機高度被ばく量の予測



(Miyake et al., 2017)

CALETによる太陽変動観測（低エネルギー宇宙線観測）

低エネルギーシャワートリガーモード

- エネルギー閾値：1.0GeV
- Targets: 低エネルギー宇宙線、ガンマ線
- 地磁気によるcutoff rigidityが約5.0GV以下の極領域のみで稼働
- ISSの1軌道につき、約90秒の観測が2回行われる

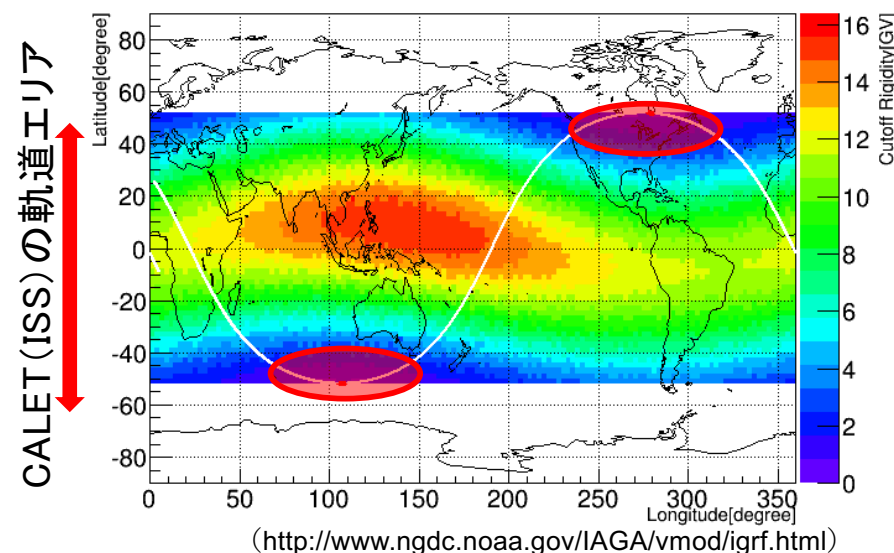
2015年10月13日～2024年12月31日の観測で..

データ取得総時間：～1367 [hours]
取得イベント数：～ 1.5×10^8 [events]



- 全電子の強度変動
- 電子・陽子計数率の変動
- 電子・陽子のフォーブッシュ減少

ISS軌道上のカットオフリジディティマップ



CALET観測期間中における太陽活動の状況

黒点数と太陽風磁場構造(カレントシートの傾き角)の変動

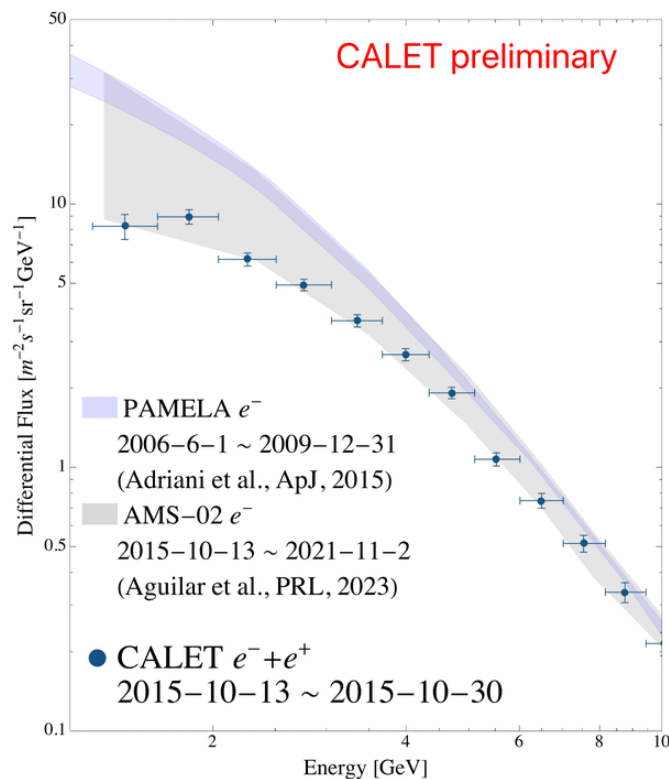


- 2019年12月に第25期太陽活動開始(太陽活動極小期)
- 2022年から急激に太陽活動が活性化
- 2023年後半以降、太陽の極域磁場が急激に低下
→ 極性が正から負へ反転したかもしれない

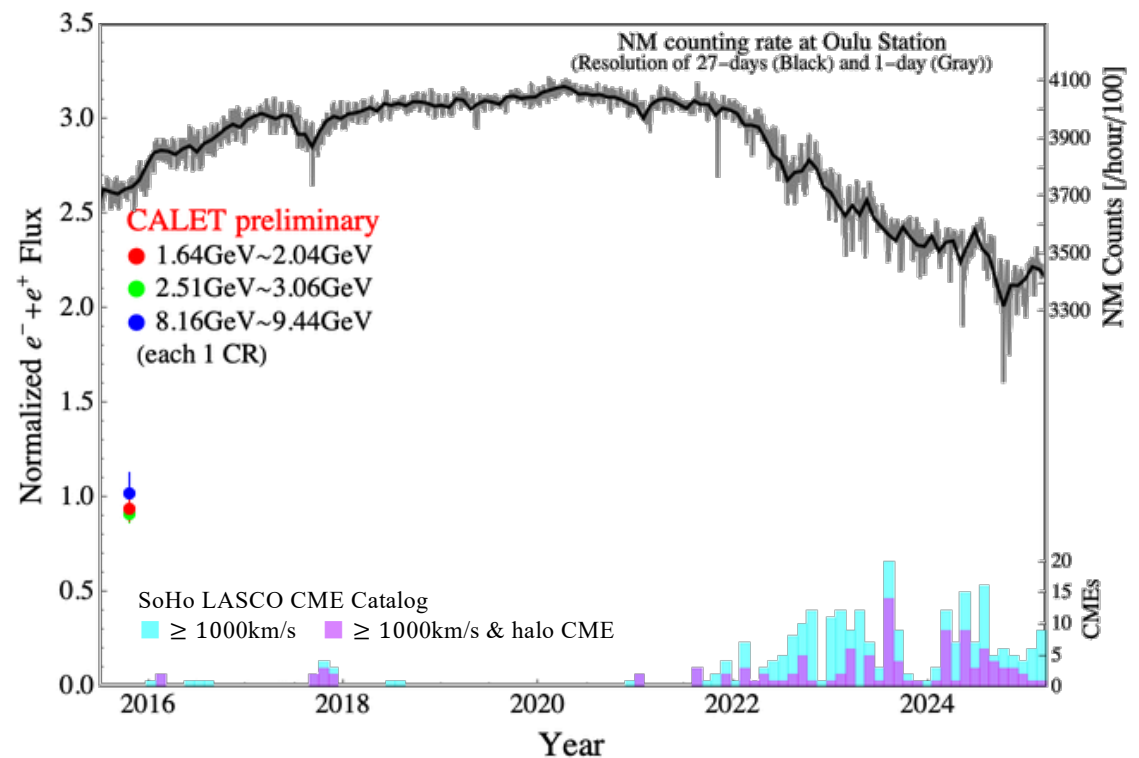
これまでの太陽変動観測：全電子の強度変動

第25期太陽活動の開始後、約半年遅れで1-10GeV領域の全電子フラックスは極大に。その後は減少を続け、現在はCALETによる観測開始以来最も低い値を検出している。

全電子エネルギースペクトル



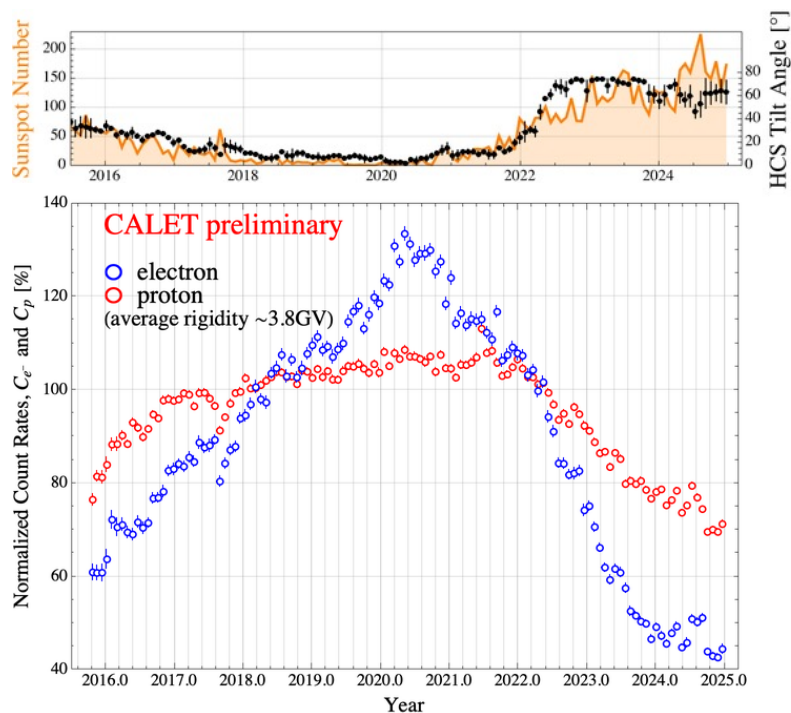
全電子強度の時間変化



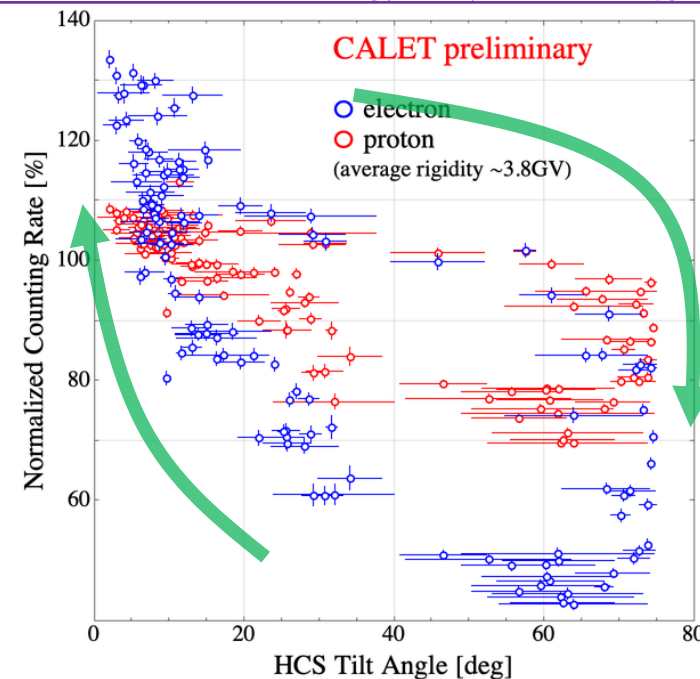
これまでの太陽変動観測：電子・陽子計数率の変動

- この10年間の電子・陽子計数率の変動から、顕著な荷電依存性を確認

電子・陽子計数率の時間変化



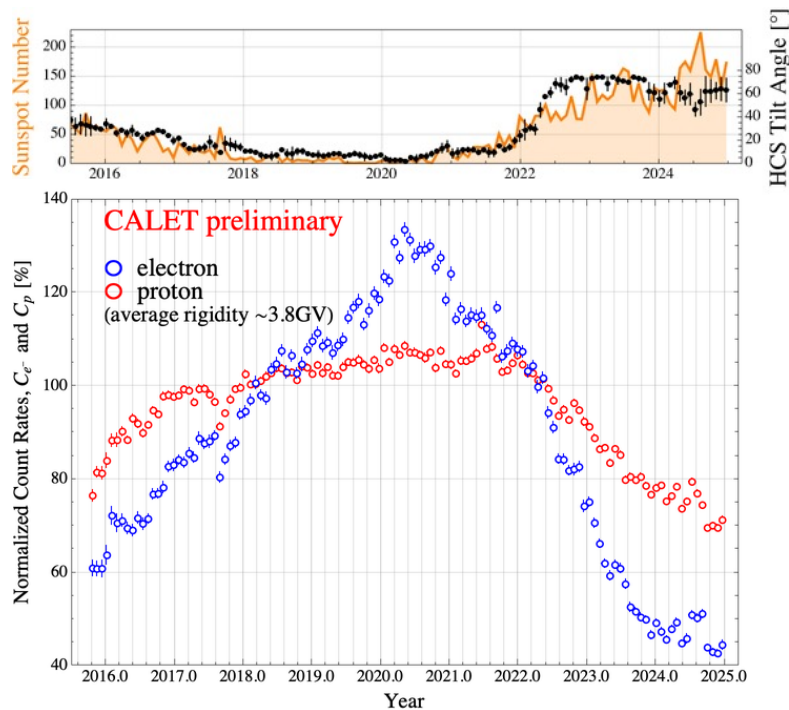
電子・陽子計数率と太陽磁場構造 (カレントシートの傾き角)との相関関係



これまでの太陽変動観測：電子・陽子計数率の変動

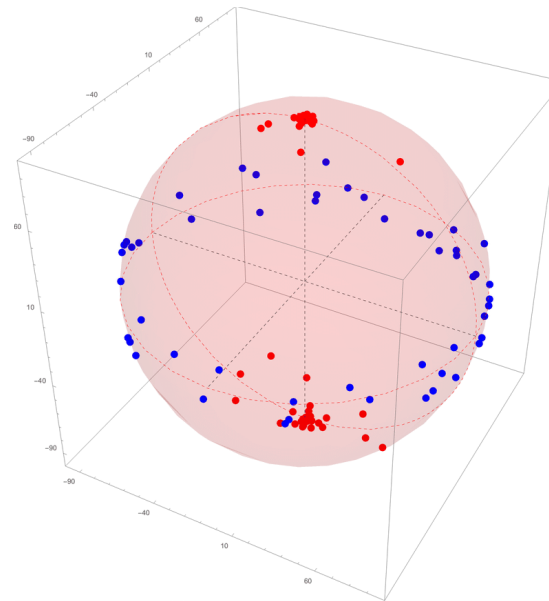
- この10年間の電子・陽子計数率の変動から、顕著な荷電依存性を確認
- ドリフトモデルでCALETの観測した荷電依存性(電子・陽子計数率の変動)の再現に成功
- 陽子計数率も電子と同じくCALETによる観測開始以来最も低い値を検出している。

電子・陽子計数率の時間変化

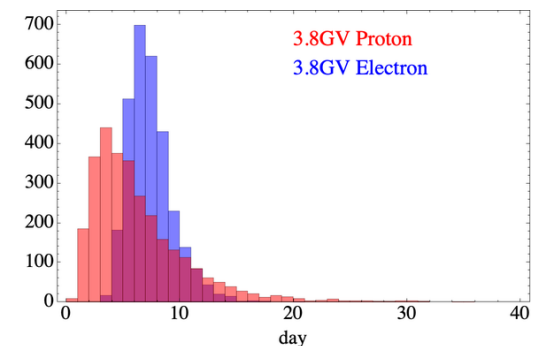


2020年5月における電子・陽子の太陽圏内伝播

サンプルパス (50 events)



伝播時間



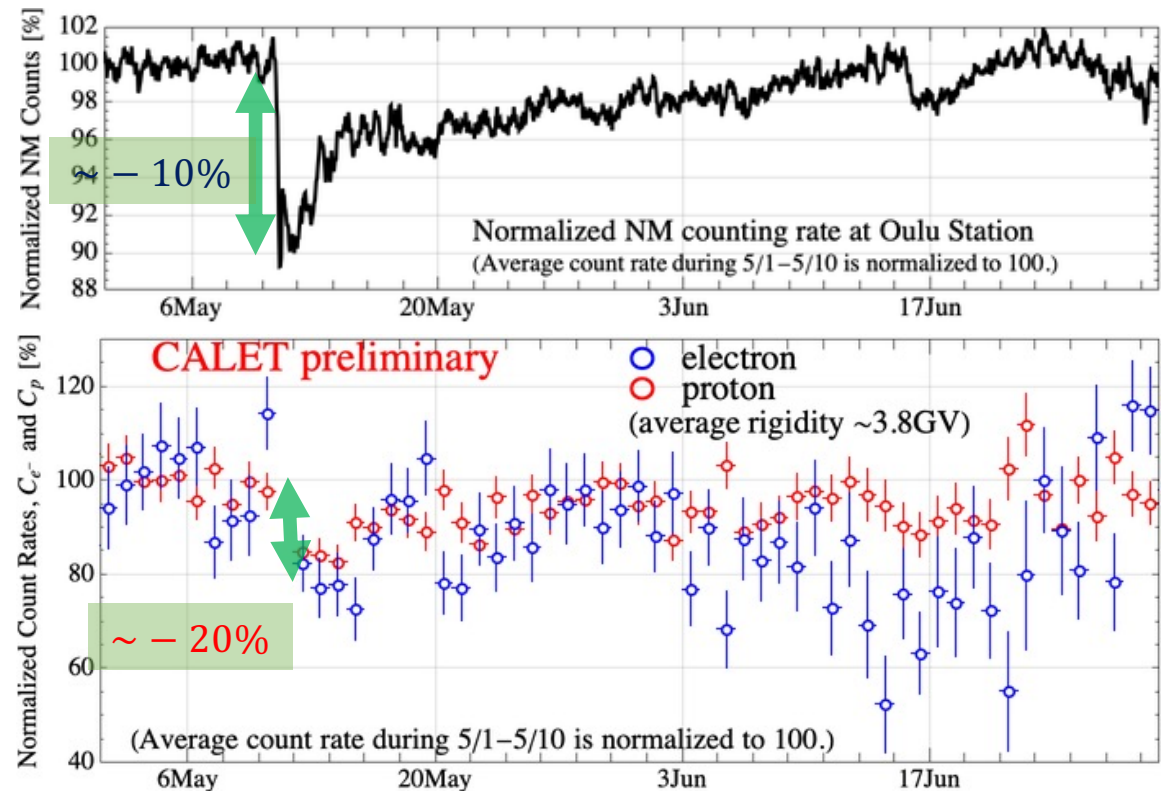
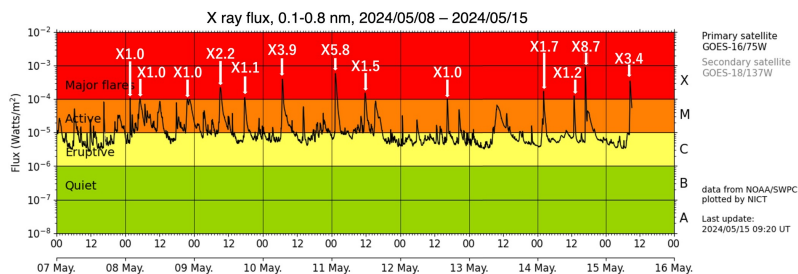
これまでの太陽変調観測：電子・陽子のフォーブッシュ減少

地上の中性子モニタに矛盾しないタイミングで複数のフォーブッシュ減少を検出

Xクラス太陽フレアによる合体したCME由来のフォーブッシュ減少

2024年 5月

GOES X-ray flux (NOAA)

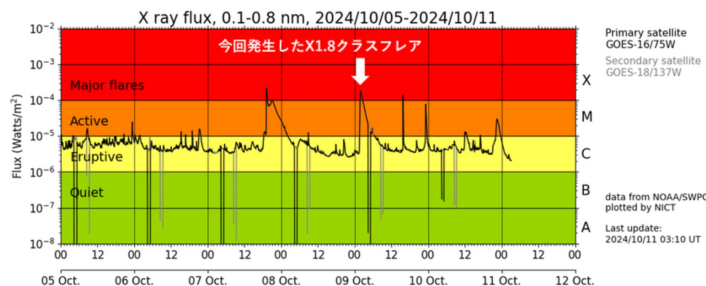


これまでの太陽変動観測：電子・陽子のフォーブッシュ減少

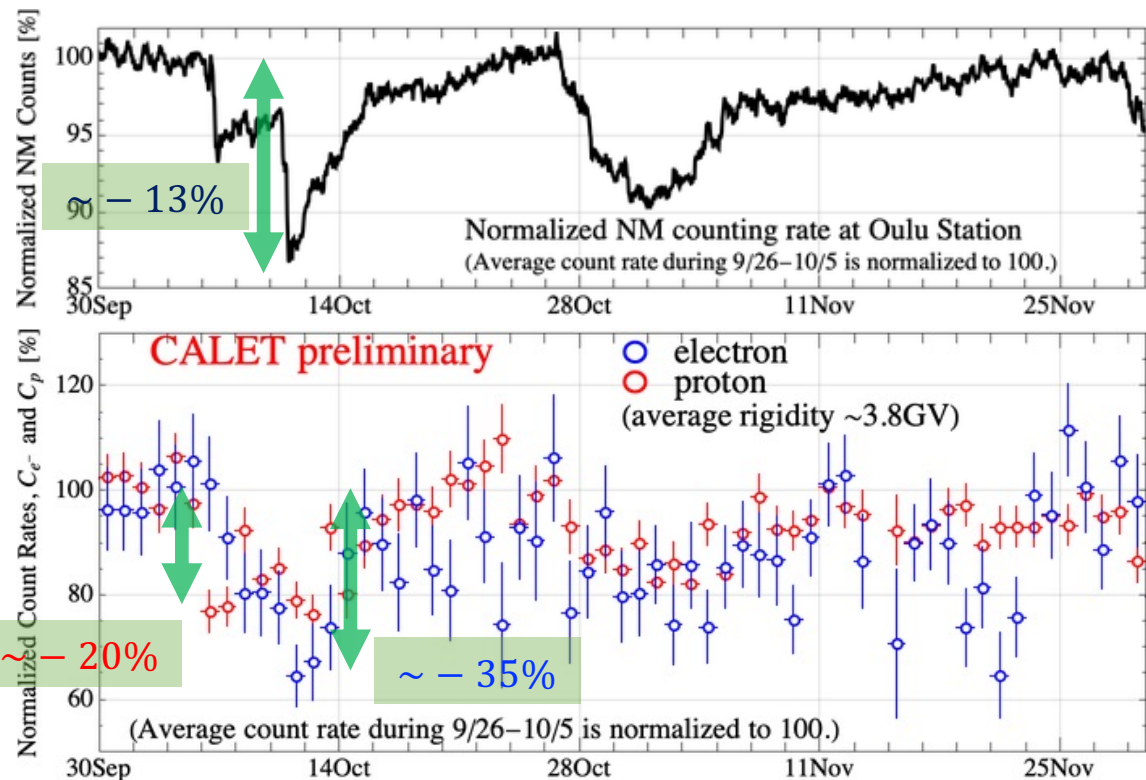
地上の中性子モニタに矛盾しないタイミングで複数のフォーブッシュ減少を検出

2024年 10月

GOES X-ray flux (NOAA)



複数の太陽フレアによるCME由来のフォーブッシュ減少

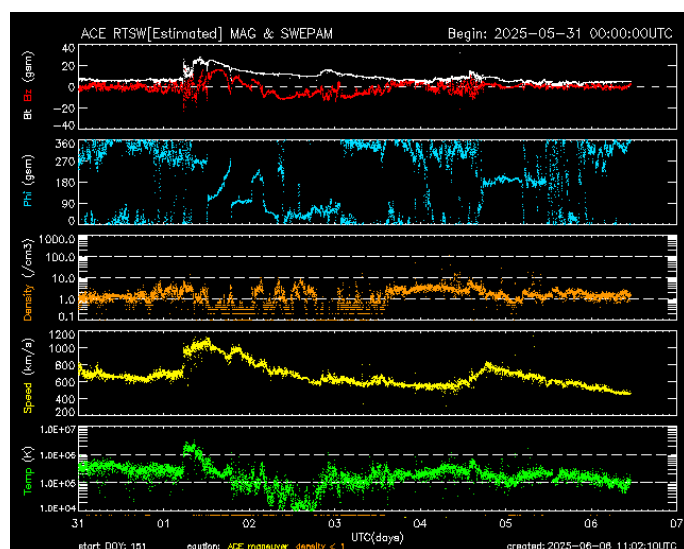


これまでの太陽変動観測：電子・陽子のフォーブッシュ減少

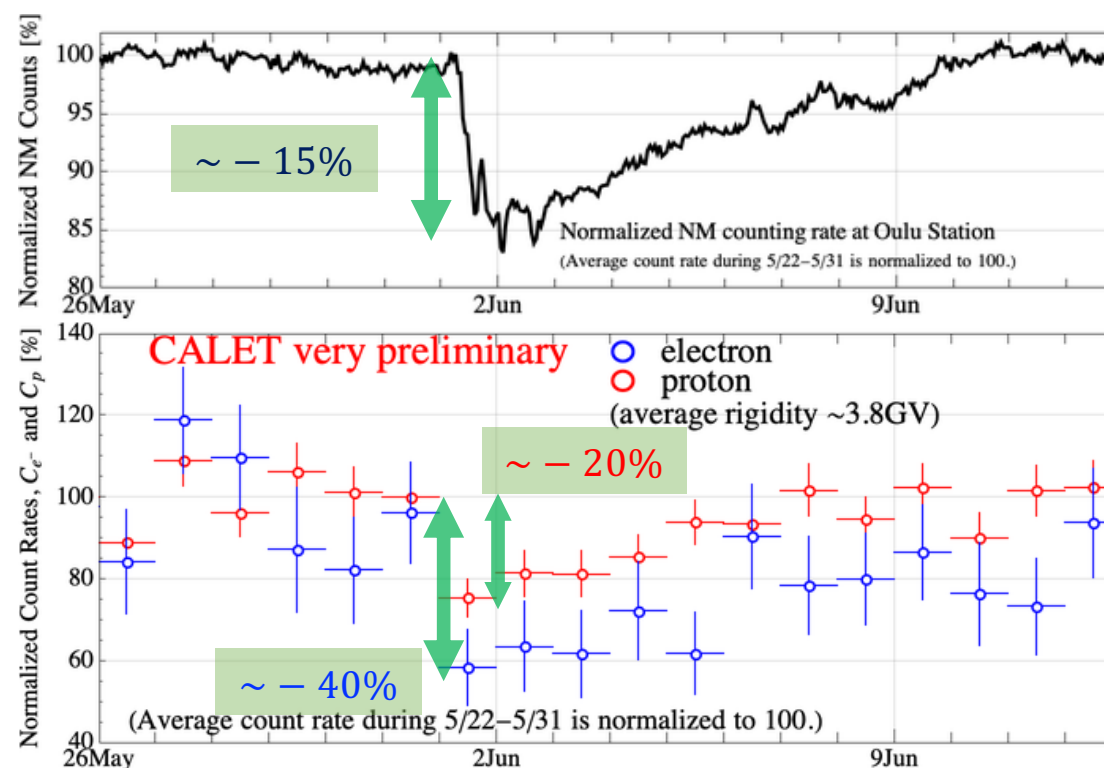
地上の中性子モニタに矛盾しないタイミングで複数のフォーブッシュ減少を検出

2025年 6月

ACE Real-Time Solar Wind (NOAA)



高速太陽風に付随するICME由来のフォーブッシュ減少



まとめ

- CALETは観測開始以来太陽活動約一周期にわたり、地球極域における1-10GeV電子の継続的な観測に成功している。
- 月次スケールでの全電子の強度変動、日次～月次スケールでの電子・陽子計数率の変動の解析が進行中であり、ドリフトモデルに矛盾しない太陽変調の荷電依存性や地上の中性子モニタに矛盾しないタイミングで複数のフォーブッシュ減少を検出している。
- 今後も解析精度を向上し、理論解釈も同時に実施することで、銀河宇宙線太陽変調の描像や低エネルギー宇宙線に隠れる物理が明らかになる。
- CALETによる大量の精密観測データと理論計算との比較・検証により、予測も可能なレベルの太陽変調モデルの構築が期待される。これは、宇宙天気予報など近接関連分野の研究へも寄与する。